



João José Ferreira Gomes Russo

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

Adaptação de dois fornos eléctricos para tratamentos térmicos e fundição

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Rosa Miranda, Prof. Doutora, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Jorge Joaquim Pamies Teixeira
Arguente: Prof. Doutor Carlos Caiado Ferreira
Vogal : Prof. Doutora Rosa Maria M. Miranda



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março 2012

Copyright

Adaptação de dois fornos eléctricos para processos de tratamentos térmicos e fundição.

©João José Ferreira Gomes Russo, FCT-UNL, 2012

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

A realização deste trabalho apenas foi possível graças ao contributo, empenho e apoio de várias pessoas às quais é imprescindível agradecer.

Agradeço à minha orientadora, Professora Rosa Maria Mendes Miranda, pela oportunidade de ter realizado este trabalho assim como, pela disponibilidade sempre demonstrada.

Um sincero obrigado a todos os Professores do Núcleo de Tecnologia Industrial, em especial ao Professor Pamies Teixeira pelo constante apoio e interesse demonstrado.

Ao Professor Carlos Caiado Ferreira, pois sem ele este trabalho não tinha sido possível. No final dos anos 90, iniciou este projecto, tendo adquirido a maior parte dos equipamentos necessários à construção de ambos os fornos. Um sincero agradecimento também pelo interesse sempre demonstrado e pelas ajudas preciosas na realização deste trabalho.

Um especial agradecimento aos Srs. António Campos e Paulo Magalhães por toda a sua assistência técnica neste trabalho, assim como pelo apoio e grande amizade sempre demonstrada. Ao Victor Hugo um muito obrigado pela assistência técnica realizada neste trabalho. Não podia deixar de agradecer também ao Mestre João Gonzalez, por toda a ajuda no que diz respeito a problemas informáticos.

Aos meus colegas e amigos, também futuros engenheiros, um muito obrigado pela ajuda e força demonstrada no decorrer desta vida académica. Um especial abraço para os meus amigos Filipe Marques, Jorge Bernardo, Hélder Guerra, Rodrigo Pires, Gonçalo Sorger, Duarte Lousa, João Violante, Nuno Lopes e Tiago Baptista.

Um grandíssimo obrigado à Mafalda por toda a amizade, carinho e dedicação demonstrada ao longo destes muitos anos juntos. Não posso também deixar de agradecer os puxões de orelha que foram essenciais para o meu sucesso na Faculdade. Muito obrigado!

A toda à minha família em especial, aos meus País, Irmã e à minha querida Avó um muito obrigado por todo o apoio e carinho demonstrado durante todos estes anos.

Aos meus grandes amigos de sempre um profundo obrigado por todos os momentos de distração e apoio durante estes anos de faculdade. Em especial aos meus grandes amigos e colegas Luís Almeida e Rodolfo Silva.

Resumo

A adaptação de equipamentos é cada vez mais uma necessidade nas empresas como meio de se adaptarem rapidamente ao mercado, sem que para isso tenham grandes custos associados.

A presente dissertação teve como objectivo retomar um antigo projecto de construção de dois fornos do Núcleo de Tecnologia Industrial (NTI) do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial.

Inicialmente estes fornos tinham sido projectados para fundição de ligas com baixo ponto de fusão. Com a necessidade de aumentar a capacidade do Laboratório de Tecnologia Industrial, pretendeu-se adaptar um dos fornos para a realização tratamentos térmicos mantendo o outro para processos de fundição.

Para isso, efectuou-se um levantamento dos elementos existentes e identificaram-se os componentes necessários a construir de modo a tornar os fornos operacionais. Após a fase de montagem, procedeu-se à modelação e instalação dos sistemas de controlo em ambos os equipamentos.

Finalmente, instrumentaram-se os fornos de modo a caracterizar o seu comportamento, analisando essencialmente o perfil térmico no interior dos fornos. Para isso programaram-se ciclos de aquecimento e arrefecimento numa gama de temperaturas e velocidades características de tratamentos de envelhecimento de ligas de alumínio e recozimentos de aços.

Palavras-chave: Fornos; Fundição; Tratamentos-térmicos; Temperatura

Abstract

Equipment modification and upgrading in industry, aiming to reduce costs, is of great importance. This is based on the flexibility of certain equipments to perform a wide number of processes, thus adapting quickly to market demands.

This thesis aimed to resume an old project with the objective of upgrading two furnaces to be used in Núcleo de Tecnologia Industrial (NTI) in Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial.

The initial project was developed with a single purpose, to perform casting of low melting temperature alloys. With the increasing needs of the NTI, it was necessary to adapt one of the furnaces to perform heat treatments, leaving the other with its initial objective.

After gathering the most suitable materials for the project, its components were designed and manufactured. The adjustment of temperature control modules for both furnaces was also essential and built.

Finally, it was necessary to provide the furnace with reading instruments, essential to acquire data for thermal characterization, but also, to determine heating and cooling curves in order to achieve a good knowledge that allows performing the processes with maximum control.

Keywords: Furnace; Foundry; Heat-treatment ;Temperature;

Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo	iii
Abstract.....	v
Índice de Figuras.....	ix
Índice de tabelas.....	xiii
Siglas	xv
Nomenclatura.....	xv
Capítulo 1.....	1
1.1 - Introdução.....	1
1.2 - Motivação	2
1.3 - Objectivo da dissertação	2
1.4 – Estrutura da dissertação	3
Capítulo 2 - Características e tipologia dos fornos.....	5
2.1 - Sistemas de controlo de temperatura.....	6
2.2 - Sistemas de controlo de atmosfera	8
2.3 - Materiais refractários usados na construção de fornos.....	9
2.4 - Eficiência dos fornos.....	11
2.5 - Principais tipos e características dos fornos usados em Fundição.....	12
2.5.1 - Fornos de cadinho	12
2.5.2 - Fornos cilíndricos rotativos ou oscilantes.....	13
2.5.3 - Fornos eléctricos	13
2.5.3.1 - Fornos aquecidos por arco eléctrico	13
2.6 - Principais tipos e características de fornos usados em tratamentos térmicos.....	15
2.6.1 - Fornos contínuos	15
2.6.1.1 - Forno de soleira vibratória	15
2.6.2 - Fornos por lotes	16
2.6.2.4 - Forno de campânula	18
2.6.2.5 - Fornos de têmpera.....	19
2.7 - Fabricantes de fornos industriais.....	22
2.8 - Síntese do Capítulo.....	24
Capítulo 3 – Descrição do Projecto.....	25
3.1 – Projecto e construção do forno de fundição	26
3.2 – Projecto e construção do forno de tratamentos térmicos	36

3.3 - Projecto e instalação do sistema de potência e controlo dos fornos	47
3.3.1 - Sistema de Controlo e Potência do forno de Tratamentos Térmicos	48
3.3.2 - Sistema de Controlo e Potencia do forno de Fundição	51
3.4 – Instrumentação	52
3.5 - Síntese do capítulo	54
Capítulo 4 - Resultados	55
4.1 – Caracterização do funcionamento do forno de tratamentos térmicos.....	55
4.2 – Caracterização do funcionamento do forno de fundição	77
Capítulo 5 – Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	83
Referencias Bibliográficas	87
Anexos	XIX
A1 - Instruções básicas de programação do controlador acoplado ao forno de tratamentos térmicos – RKC - P 300	XXI
A2 - Instruções básicas de programação do controlador acoplado ao forno de fundição – RKC - P 96	XXV
B1 – Especificações do ampop utilizado na simulação em simulink.....	XIX

Índice de Figuras

Figura 1 - Esquema básico de controlo de Temperatura	6
Figura 2 - Forno de cadinho a óleo [2]	12
Figura 3 - Forno cilíndrico rotativo	13
Figura 4 - Forno eléctrico de indução [5]	14
Figura 5 - Forno soleira móvel [7]	17
Figura 6 - Forno tipo Mufla [8]	17
Figura 7 - Forno tipo poço [8]	18
Figura 8 - Forno campânula tipo sino [9]	19
Figura 9 - Principais Países Europeus produtores de fornos industriais [9]	22
Figura 10 - Principais Países Exportadores de fornos industriais [9]	22
Figura 11 - Evolução nas exportações dos principais países produtores no período de 2001 a 2008, [9]	23
Figura 12 - a) Pormenor das resistências da câmara do forno b) Câmara do forno	25
Figura 13 - a) Estrutura de suporte b) Plataforma de Trabalho	26
Figura 14 - Base do forno de fundição	27
Figura 15 - Pormenor da face superior do forno de fundição	27
Figura 16 - Projecto Forno fundição, 1ª opção	28
Figura 17 - Projecto da tampa do forno de fundição	28
Figura 18 – Tampa do forno de fundição a) Pormenor da tampa do forno de fundição b) vista geral	29
Figura 19 - Esquema do sistema hidropneumático	30
Figura 20 – Sistema hidropneumático de posicionamento do cadinho	31
Figura 21 – Posicionador do cadinho	31
Figura 22 - Introdução do cadinho no forno a) Posição inicial b) Posição final	32
Figura 23 - Isolamento da face inferior da câmara do forno a) Fase de introdução/remoção do cadinho b) Fase de aquecimento	32
Figura 24 - Transferência de calor radial	33
Figura 25 - Transferência de calor longitudinal no forno de fundição	34
Figura 26 - Estrutura de suporte da câmara do forno	36
Figura 27 - Estrutura e suporte da câmara do forno	37
Figura 28 - Forno de Tratamentos térmicos em fase de construção	37
Figura 29 – Porta do forno a) Vista posterior b) Vista frontal	38
Figura 30 - Tabuleiro de posicionamento das amostras	39
Figura 31 - Projecto da estrutura interna do forno	39
Figura 32 - Câmara do forno com estrutura interna instalada	40
Figura 33 - Estrutura interna do forno de tratamentos térmicos	42
Figura 34 - Anéis de Aço Inox	42
Figura 35 - a) Anel de fixação da estrutura b) Pormenor dos pinos de fixação	43
Figura 36 - Forno de Tratamentos Térmicos	44
Figura 37 – a) Forno de Tratamentos térmicos b-)Pormenor do tabuleiro de posicionamento das amostras	44
Figura 38 - Transferência de calor radial no forno de Tratamentos térmicos	45

Figura 39 - Transferência de calor longitudinal no forno de tratamentos térmicos	46
Figura 40 – Pannel de controlo a) Vista geralb) Pormenor do comando de corte geral de corrente	48
Figura 41 - Controlador REX-P300.....	49
Figura 42 - Tiristor 425 A	49
Figura 43 – Esquema dos circuitos de controlo e potência do forno de tratamentos térmicos	50
Figura 44 - Controlador REX-P96	51
Figura 45 - Relés de Estado sólido	51
Figura 46 - Esquema dos circuitos de controlo e potência do forno de fundição	52
Figura 47 - a) Equipamento para aquisição de dados b) Chassi (NI Cdaq-9178) c) Módulo de aquisição de temperaturas NI 9211.....	53
Figura 48 - Front Panel do software feito em LabView 2010	53
Figura 49 - Imposição de um input de 5V ao tiristor	55
Figura 50 - Curva máxima de aquecimento – input 5V.....	56
Figura 51 – Evolução da temperatura á velocidade minima de aquecimento.....	57
Figura 52 - Curvas de aquecimento em função do input.....	57
Figura 53 – Evolução da temperatura no arrefecimento do forno	59
Figura 54 – Esquema do posicionamento dos termopares.....	60
Figura 55 – Tratamento de envelhecimento de alumínio a 250°C.....	61
Figura 56 – Perfil térmico no instante t=30 min.....	61
Figura 57 – Diferença de temperaturas no tratamento de envelhecimento de aluminio a 250°C	62
Figura 58 – Envelhecimento de aluminio a 450°C	63
Figura 59-Perfil térmico no instante t=47 min	63
Figura 60 – Variação de temperatura durante tratamento de envelhecimento de aluminio a 450°C	64
Figura 61 – Recozimento subcrítico	65
Figura 62 – Perfil térmico no instante t=57 min	65
Figura 63 – Variação da temperatura durante recozimento subcrítico a 600°C	66
Figura 64 – Recozimento a 800°C.....	67
Figura 65 – Perfil térmico no instante t=13 min	67
Figura 66- Variação de temperatura durante recozimento a 800°C.....	68
Figura 67 – Recozimento subcrítico a uma taxa de aquecimento de 20°C/min	69
Figura 68 – Perfil térmico no instante t=33 min	69
Figura 69 – Perfil térmico no instante t=53 min	70
Figura 70 – Variação da temperatura durante recozimento subcrítico com uma taxa de aquecimento de 20°C/min	70
Figura 71 - Esquema de posicionamento dos termopares	71
Figura 72 - Ensaio com o objectivo de analisar o perfil térmico transversal.....	72
Figura 73- Perfil térmico transversal	72
Figura 74- Curva de arrefecimento do forno	73
Figura 75- Variação da temperatura no interior do forno durante o arrefecimento do forno	74
Figura 76 – Evolução da temperatura exterior do forno	75
Figura 77 - Circuito de transformação do output do controlador	76
Figura 78 – Esquema do posicionamento dos termopares	78

Figura 79 – Ensaio do forno de fundição	78
Figura 80- Perfil térmico no instante $t=81$ min	79
Figura 81 - Variação de temperaturas durante o ensaio de fundição	79
Figura 82 - Evolução da temperatura nas paredes exteriores do isolante.	80
Figura 83 - Perfil térmico do forno de fundição, antes e depois de optimizado	81

Índice de tabelas

Tabela 1 - Diferentes tipos de Termopares [1]	7
Tabela 2 - Propriedades gerais de materiais refractários isolantes [2].....	11
Tabela 3 - Principais empresas Europeias e Norte Americanas produtoras de fornos industriais	23
Tabela 4 - Propriedades do Aço Inox 316 a elevadas temperaturas [10]	41
Tabela 5 - Velocidades de aquecimento em função de vários inputs	58
Tabela 6- Gama de velocidades de aquecimento do forno de tratamentos térmicos	58
Tabela 7 – Velocidades médias de arrefecimento.....	59
Tabela 8 – Parâmetros dos tratamentos térmicos ensaiados	60
Tabela 9 - Zona útil do forno para cada um dos tratamentos térmicos testados	71
Tabela 10 – Temperaturas nas paredes exteriores do isolante no forno de tratamentos térmicos	75
Tabela 11 – Parâmetros de funcionamento do forno de tratamentos térmicos	76
Tabela 12 – Tabela com os valores de U_{out} , obtidos numericamente pelo <i>software</i> simulink..	77
Tabela 13 – Temperaturas nas paredes exteriores de isolante no forno de fundição	80

Siglas

MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
NTI	Núcleo Tecnologia Industrial
PID	Programador Integral Diferencial
TIG	Tungsten Inert Gas

Nomenclatura

H	Coeficiente de convecção
I	Momento de Inércia
K	Condutividade térmica
l	Comprimento
Q_{cond}	Fluxo de calor por condução
Q_{conv}	Fluxo de calor por convecção
r_e	Raio exterior
R_i	Raio Interior
T_p	Temperatura de superfície
Z	Distância ao eixo neutro
σ_{xx}	Tensão normal

Capítulo 1

1.1 - Introdução

Num tempo em que escasseiam os recursos financeiros, a adaptação de equipamentos é cada vez mais, encarada pelas empresas como meio de se adaptarem continuamente às exigências do mercado, permitindo assim uma considerável redução dos custos de produção. A presente dissertação visou adaptar dois fornos eléctricos para realizar tratamentos térmicos e fundição, dois processos tecnológicos vastamente utilizados na indústria.

O processo de fundição teve uma enorme importância na evolução da humanidade. No período neolítico, com a necessidade de fabricar armas, ferramentas e utensílios agrícolas o Homem começou a dominar, ainda que de modo muito rudimentar, a técnica de fundição. Inicialmente, começando apenas por fundir metais de baixo ponto de fusão como o cobre, o estanho e o bronze. Mais tarde, a evolução das técnicas de fundição permitiu a fusão de metais com pontos de fusão mais elevados como o ferro.

A fundição tem como princípio básico dar a forma geométrica pretendida ao metal, vazando-o no estado líquido para dentro de um molde, de modo a obter a peça desejada após solidificação.

A fundição baseia-se fundamentalmente no princípio clássico de Arquimedes, em que,

“o líquido toma a forma do vaso que o contém”

Embora hoje em dia já não tenha a relevância industrial que teve no passado, este processo ainda se revela bastante útil devido à sua grande flexibilidade assim como, ao reduzido custo de produção apresentado. Permite fabricar uma enorme variedade de peças, com as mais diversificadas formas, muitas delas bastante complexas, sendo difíceis de obter por outro processo. Tem como desvantagem a baixa qualidade superficial das peças, sendo frequentemente necessário recorrer a operações de acabamento, normalmente desbaste e polimento, de modo a conferir às mesmas as dimensões e qualidade superficial necessárias.

Os desenvolvimentos observados na fundição permitiram evoluir desde um processo "quase artesanal" para um processo tecnológico, em alguns casos, de elevada complexidade e valor acrescentado. Os custos com energia, bem como aspectos ambientais e de higiene e segurança dos trabalhadores, constituem a maior limitação deste processo.

Outro grupo de processos tecnológicos envolvendo temperaturas elevadas é o dos tratamentos térmicos. Estes têm como objectivo alterar a estrutura do material de modo a melhorar as suas propriedades mecânicas.

Os tratamentos térmicos podem ser divididos em dois grupos, tratamentos térmicos caracterizados por um conjunto de operações de aquecimento e arrefecimento sob condições controladas, tais como a temperatura e a velocidade de aquecimento/arrefecimento e tratamentos termoquímicos que visam alterar a composição química da superfície da peça, resultando num aumento da resistência ao desgaste, atrito e abrasão. Os tratamentos térmicos têm uma enorme importância pois permitem alterar um conjunto de propriedades dos materiais, como por exemplo, a resistência mecânica, ao desgaste, à corrosão, à fluência, entre outras.

São também um processo indispensável no contexto da tecnologia industrial, pois possibilitam a redução de tensões residuais decorrentes de outros processos tecnológicos, como é o caso da soldadura ou da maquinação, melhorando assim o desempenho em serviço dos componentes.

1.2 - Motivação

A motivação para a elaboração desta dissertação residu no facto do Núcleo de Tecnologia Industrial dispor de dois fornos para fundição que não estavam em funcionamento, e assim, modificá-los e instrumentá-los de modo a torná-los operacionais para processos de tratamentos térmicos a temperaturas até 800 °C, assim como para fundição de ligas com baixo ponto de fusão. Com estes equipamentos foi possível aumentar a capacidade do Laboratório de Tecnologia Industrial relativamente a estes dois processos tecnológicos, vastamente aplicados na indústria.

1.3 - Objectivo da dissertação

A presente dissertação tem como principal objectivo retomar um antigo projecto de construção de dois fornos a serem usados no Núcleo de Tecnologia Industrial (NTI) do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial, com o fim de executarem processos de fundição de ligas com baixos pontos de fusão.

Criando uma descontinuidade com o projecto inicial, pretendeu-se adaptar um dos fornos por forma a executar apenas tratamentos térmicos, dedicando o outro forno a processos de fundição, como tinha sido inicialmente projectado.

Para isso foi necessário conceber e construir alguns componentes, que passaram a fazer parte integrante dos equipamentos, assim como fazer uma recolha dos materiais indicados para esses mesmos elementos. Foi ainda necessário modelar e instalar o sistema de controlo e o sistema de potência de ambos os fornos. Por fim, foram instrumentados e testados.

1.4 – Estrutura da dissertação

A presente dissertação é composta por cinco capítulos. O primeiro capítulo é de carácter introdutório, onde são expostos os objectivos da dissertação, assim como uma breve introdução aos processos tecnológicos, sobre os quais incide esta dissertação.

No segundo capítulo apresenta-se uma descrição dos principais tipos de fornos usados em processos de fundição, assim como em tratamentos térmicos, referindo as principais características destes equipamentos.

No terceiro capítulo descreve-se o trabalho desenvolvido, incluindo o projecto de construção do forno de fundição e do forno para tratamentos térmicos. O projecto de construção de ambos os fornos é constituído essencialmente por três partes: projecto e montagem mecânica, instalação do sistema de controlo e potência e instrumentação.

No quarto capítulo é apresentada a validação do projecto, sobretudo relativa à caracterização térmica dos fornos. No quinto, e último, capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho realizado.

Capítulo 2 - Características e tipologia dos fornos

Os fornos são equipamentos essenciais na fundição de metal assim como nos tratamentos térmicos. Independentemente da sua aplicação, estes têm como objectivo primordial fornecer calor ao material com o melhor rendimento possível e com a máxima segurança para o operador. Existem inúmeros tipos de fornos, consoante a sua aplicação, combustível usado, tipo de construção, assim como tipo de atmosfera utilizada.

Quanto ao tipo de forno, estes podem ser essencialmente de poço, de mufla ou de campânula. Podem ser horizontais ou verticais, os primeiros são usados essencialmente para processos de tratamentos térmicos, enquanto os segundos são normalmente usados em processos de fundição. Relativamente ao modo de operação podem ser contínuos (*continuos furnaces*), como os usados na indústria cerâmica, ou por lotes (*batch furnaces*). Finalmente quanto ao tipo de atmosfera podem ser de atmosfera controlada ou a vácuo.

Mais adiante serão analisados em maior detalhe diferentes tipos de fornos usados nos processos de tratamentos térmicos assim como de fundição.

Qualquer que seja o tipo de forno assim como o tipo de combustível usado, estes devem obedecer, entre outras, às seguintes especificações:

- Fornecer um ambiente controlado para o desenvolvimento do processo.
- Ter a melhor geometria possível para haver uma transferência de calor eficaz e uniforme.
- Minimizar perdas de calor por condução convecção e radiação, maximizando o rendimento.
- Minimizar a corrosão devido às altas temperaturas.
- Evitar contaminações das peças/produtos.

Para o sucesso de qualquer operação de fundição quer de tratamentos térmicos, é necessário ter o total controlo sobre as variáveis envolvidas no processo como é o caso da temperatura e da atmosfera do forno. Para que isso seja possível, os fornos estão instrumentados de modo a fornecerem ao operador as informações necessárias sobre o processo. Nos dois subcapítulos seguintes fez-se uma breve abordagem sobre este tipo de instrumentos.

2.1 - Sistemas de controlo de temperatura

A temperatura é a variável mais importante nestes processos, sendo assim necessário um rigoroso controlo da mesma. Sobretudo nos processos de tratamentos térmicos, o controlo da temperatura revela-se de extrema importância, estes processos devem ser controlados com um erro no máximo $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$, embora para temperaturas elevadas, acima dos 700°C , o erro admissível se situe em $\pm 8^{\circ}\text{C}$ [1].

Os fornos estão equipados com um conjunto de dispositivos electrónicos que permitem um controlo da temperatura, impondo taxas de aquecimento e arrefecimento constantes. A velocidade de aquecimento e de arrefecimento deve ser controlada bem como o perfil de temperaturas no interior do forno, de modo a garantir uma distribuição uniforme de temperaturas evitando zonas “quentes” ou “frias”, assim como, gradientes de temperatura no interior do forno que possam ser nocivos para os processos tratamentos térmicos e de fundição.

Para que qualquer sistema de controlo de temperatura seja executado devem ser cumpridos três passos; medição da temperatura, leitura da temperatura e por fim acção de controlo. No primeiro passo, um sensor mede a temperatura enviando um sinal a um controlador, este de seguida interpreta o sinal vindo do sensor de temperatura comparando-o com o valor de referência, ou seja, a temperatura desejada. Por fim o controlador envia um sinal para a unidade de potência de modo a esta fornecer a energia necessária ao forno, de modo a que a diferença entre o valor real da temperatura e o valor de referência tenda para zero. Na figura 1 ilustra-se de modo simplificado este processo para um forno eléctrico [1].

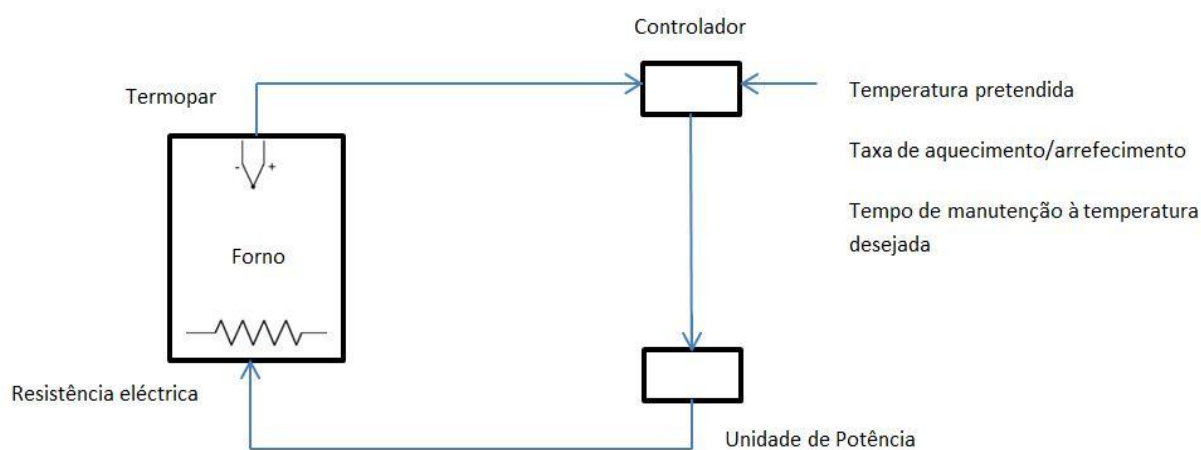


Figura 1 - Esquema básico de controlo de Temperatura

Os dois tipos de controladores mais usados são os do tipo on-off e os programáveis. Geralmente os controladores programáveis são preferidos aos do tipo on-off pois permitem um controlo da temperatura muito mais eficiente [1].

Dos controladores programáveis destacam-se os PID (Proporcional, Integral, Diferencial). Os ganhos proporcionais, integral e derivado, são combinados de modo a que se obtenha a melhor resposta de saída do equipamento a controlar.

Ao combinar estes três métodos consegue-se o controlo básico proporcional com a eliminação do erro dado pelo método integral, assim como uma redução das oscilações proporcionado pelo método derivativo. A grande dificuldade nestes controladores advém do difícil ajustamento destes três métodos.

Os sensores de temperatura usados nestes tipos de processos podem ser divididos em dois grupos; de contacto e sem contacto. Do primeiro grupo fazem parte os detectores de temperatura por resistência, (RTD) em que a resistência é proporcional á temperatura. Tipicamente são em platina, cobre ou níquel. São mais estáveis e precisos que os termopares embora tenham como grande limitação a temperatura máxima de funcionamento, na ordem dos 750 °C, o que impede a sua utilização em muitos dos processos metalúrgicos [1].

Outros sensores do tipo contacto são os termopares, são os sensores de temperatura mais utilizados, bastante simples e de custo relativamente baixo. Consistem em dois fios metálicos, de metais diferentes unidos numa extremidade, designada por junção quente. A ligação ao controlador é feita através da outra extremidade, denominada de junção fria.

Quando este é submetido a um diferencial de temperaturas entre as duas extremidades gera um sinal eléctrico em miliVolt (mV), proporcional à diferença de temperatura, que será interpretado pelo controlador [1]. Existem inúmeras combinações de metais utilizados para a medição de temperatura, como se pode observar na tabela 1. Sendo o termopar tipo K o mais utilizado.

Tabela 1 - Diferentes tipos de Termopares [1]

Tipo	Gama de temperatura nominal de medida (°C)	Material
B	50 a 1818	Platina, 30%Ródio - Platina, 6%Ródio
E	0 a 870	Cromel – Constantan
J	-185 a 870	Ferro – Constantan
K	0 a 1260	Níquel, Cromel - Níquel, Alumínio, Cromel – Alúmel
R	0 a 1480	Platina, 13% Ródio – Platina
S	0 a 1480	Platina, 10% Ródio – Platina
T	-185 a 370	Cobre – Constantan
W5	-20 a 2205	Tungsténio, 5% Rénio- Tungsténio, 26% Rénio

Os Pirómetros de radiação são sensores de temperatura do tipo sem contacto. São utilizados para medirem temperaturas elevadas, que podem ir até 3200 °C. Estes sensores têm como grande vantagem efectuarem medições muito precisas sem necessitarem de "tocar" no corpo, alvo de medição. Assim, em muitos casos estes sensores são preferidos aos do tipo contacto, pois para além de medirem temperaturas mais elevadas em ambientes agressivos, podem também medir temperaturas de corpos ao mesmo tempo que estes se movem. Estes sensores dependem da radiação térmica gerada a partir da superfície a medir. A intensidade e o comprimento de onda da radiação dependem da temperatura da superfície [1].

2.2 - Sistemas de controlo de atmosfera

O tipo de atmosfera utilizada é um factor determinante para muitos processos tecnológicos de fundição assim como para os tratamentos térmicos. No caso dos aços, normalmente, acima dos 500 °C a presença de oxigénio dentro do forno provoca a oxidação do ferro, assim como uma diminuição considerável no teor de carbono na superfície dos aços.

Normalmente, estes fenómenos de oxidação e de descarbonatação são evitados recorrendo a uma atmosfera inerte, à base de Azoto, e a atmosferas redutoras contendo Hidrogénio ou monóxido de carbono, sendo assim, desnecessário recorrer a tratamentos de limpeza superficial, e garantindo uma superfície mais dura e resistente ao desgaste devido à ausência de descarbonatação.

Assim, e essencialmente em processos de tratamentos térmicos, o controlo da atmosfera do forno torna-se um factor determinante que não pode ser descurado. Existem dois grandes grupos de métodos de análise e controlo de atmosfera: o primeiro incide sobre a atmosfera dentro do próprio forno, enquanto o outro incide sobre a atmosfera produzida pelo gerador e que será introduzida no forno [1].

Os sensores mais comuns podem ser divididos em três grupos; sondas de oxigénio, sondas de ponto de condensação (*dew point*) e ainda sondas de infravermelho. Estes sensores são frequentemente usados para controlar atmosferas do tipo azoto-metanol, azoto-hidrocarboneto e azoto-hidrogénio. Atmosferas do tipo azoto-hidrogénio são tipicamente controladas por sensores do tipo "*dew point*". Estes sensores também são frequentemente utilizados para operações de recozimento em fornos do tipo sino [1].

As sondas de oxigénio são amplamente empregues no controlo de fornos utilizados para tratamentos térmicos de endurecimento, cementação e carbonituração. Esta sonda determina o potencial de oxidação de um gás.

Quando a temperatura da sonda está perto da temperatura do forno, esta fornece indicações precisas sobre se a atmosfera presente no forno é oxidante ou redutora.

As sondas de ponto de condensação (*dew point*) são utilizadas para determinar o teor de humidade de qualquer atmosfera, podendo também monitorizar o potencial de carbono. Estes sensores utilizam um óxido de alumínio de modo a gerar um sinal eléctrico proporcional ao teor de humidade.

O sensor basicamente tem como material base o alumínio, tendo na sua superfície um óxido de alumínio, coberto por uma fina camada de metal permeável. A base de alumínio juntamente com esta camada de metal permeável forma um condensador. A humidade ao passar pela camada permeável de metal é absorvida pelo óxido de alumínio alterando assim a capacitância do conjunto, proporcionalmente ao teor de humidade presente na atmosfera [1].

As sondas de infravermelho são normalmente utilizadas para medir teores de monóxido de carbono, dióxido de carbono e metano, existentes na atmosfera. Ao emitir radiações no infravermelho, os compostos presentes na atmosfera vão absorver essas radiações proporcionalmente à sua quantidade na atmosfera, sendo os comprimentos de onda diferentes para cada composto, estas sondas têm como grande limitação o facto de não detectar gases elementares como o oxigénio e o hidrogénio, pois estes não absorvem radiações no infravermelho. [1]

Também é recorrente a utilização de fornos a vácuo de modo a impedir a oxidação do material a ser aquecido, assim como a contaminação por produtos provenientes da combustão, isto nos fornos aquecidos por meio da queima de combustível, líquido ou gasoso.

Dependendo dos requisitos do material a ser aquecido, assim como do tipo de processo de tratamento térmico, os fornos de vácuo possuem uma bomba de médio vácuo que assegura uma pressão mínima de 10^{-2} mbar ou uma bomba de alto vácuo que assegura uma pressão mínima na ordem de 10^{-5} mbar.

2.3 - Materiais refractários usados na construção de fornos

Os fornos são usualmente construídos com recurso a materiais refractários. Estes materiais têm como principal característica o facto de resistirem a altas temperaturas sem que se alterem as suas propriedades térmicas e mecânicas. Os fabricantes destes materiais refractários produzem-nos numa série de formas, sendo as mais comuns em forma de tijolo, com lados paralelos para superfícies planas, ou com lados cónicos para construções cilíndricas.

Estes materiais são usados essencialmente no revestimento interno de fornos industriais usados nas mais variadas indústrias. De seguida apresentam-se alguns destes materiais utilizados em fornos, de forma mais pormenorizada.

Os refractários silicosos são compostos por cal ligada a sílica com um teor de 93%, embora já não muito utilizados, actualmente, estes refractários ainda são usados em altos-fornos e na indústria do vidro, assim como em regeneradores e fornos de reaquecimento. Estes materiais refractários silicosos, contêm um mínimo de 80% de sílica e 10 a 15% de alumina. São extremamente resistentes a cinzas e escórias, devido à formação de um esmalte viscoso [2].

Os refractários de alumina são compostos por minerais de alto teor em alumina, como a bauxite. Estes refractários são bastantes resistentes ao óxido de ferro, sendo usados a altas temperaturas (cerca de 1700 °C) em fornos na indústria cerâmica [2]. Já os materiais de Zircónio e refractários de zircónia, além de um alto ponto de fusão, têm uma expansão térmica muito reduzida e óptima resistência á abrasão. Este material é usado quando é requerido um refractário ácido.

A zircónia tem uma baixa condutividade térmica, embora tenha uma elevada expansão térmica, por isso, vulgarmente, são adicionadas á zircónia pequenas quantidades de MgO , CaO ou Y_2O_3 de modo a estabilizar o material, conferindo-lhe características de expansão linear. São fundamentais em revestimentos de fornos de indução, assim como em fornos de cadinho [2].

Finalmente, os materiais refractários de Carbono são utilizados em soleiras de altos-fornos assim como em fornos de eléctrodos. Os materiais refractários de carboneto de silício são também compostos por argila. Têm uma elevada condutividade térmica, resistência mecânica, à corrosão assim como ao choque térmico. Suportam até 1600 °C em atmosferas oxidantes [2].

Alguns destes materiais refractários apresentam uma condutividade térmica elevada, o que implica perdas de calor através das paredes do forno reduzindo assim a eficiência do mesmo. Por forma a minimizar estas perdas, os fornos são isolados termicamente recorrendo a materiais refractários isolantes. Estes materiais são caracterizados por terem uma reduzida condutividade térmica embora, ao contrário dos acima descritos, não suportem temperaturas tão elevadas. Têm também, como limitação, uma fraca resistência ao choque. Estes materiais são bastante usados como isolantes térmicos exteriores, permitindo assim o fabrico de paredes mais finas [2].

Ao contrário dos anteriores estes são geralmente fabricados em forma de placa, de manta, ou até de aglomerados. Na tabela 2 apresentam-se alguns tipos destes materiais.

Tabela 2 - Propriedades gerais de materiais refractários isolantes [2]

Tipo		Placas isolantes (silicato de cálcio)				Manta cerâmica			Aglomerados		
		%	35,0	35,0	35,0	56,0	50,0	44,5	Diatomite	Perlite	Vermiculite
SiO ₂	%	35,0	35,0	35,0	56,0	50,0	44,5	86,0	70 a 75		
FeO ₃	%	-	-	-	0,9	0,4	0,06	2,0	0,5 a 2		
Al ₂ O ₃	%	-	-	-	41,0	48,0	50,0	-	12 a 15		
CaO/MgO	%	65,0	65,0	65,0	0,2	0,2	0,2	3,0	0,5 a 2,2		
TrO ₂	%	-	-	-	1,5	1,0	0,06	-	-		
Na ₂ O/K ₂ O	%	-	-	-	0,4	0,4	0,18	5,0	3 a 9		
(Mg,Fe,Al) ₃	%									100	
Densidade	Kg/m ²	850	360	120	64/96/128	64/96/128	96/128				
Temperatura de serviço	°C	1000	1000	1000	1050	1260	1450				
Condutividade térmica	400°C	W/m°C	0,12	0,07	0,05	0,095/0,095/0,076	0,097/0,082/0,075	0,092/0,082	0,12	0,17	0,06
	800°C	W/m°C	0,12	0,12	0,12	0,245/0,220/0,170	0,245/0,205/0,170	0,205/0,179	0,16	0,22	0,12
	1000°C	W/m°C	0,12	0,12	0,12	0,326/0,285/0,237	0,333/0,270/0,220	0,268/0,234			

O modo como os fornos são revestidos termicamente, bem como o tipo de material isolante a utilizar, são questões de grande importância. A eficiência energética depende directamente do modo como estes equipamentos estão isolados.

2.4 - Eficiência dos fornos

O conceito de eficiência de um sistema é bastante simples e quando aplicado a estes tipos de equipamentos não é mais que uma razão entre a energia útil e a energia total fornecida ao sistema.

$$\eta = \frac{\text{Energia útil}}{\text{Energia total}}$$

A maioria dos fornos tem um rendimento bastante baixo, que se situa entre 5% e 35%. Assim, devido aos actuais custos energéticos, esta questão tornou-se de extrema relevância tendo-se adoptado várias medidas de modo a aumentar a eficiência energética dos fornos. Actualmente, para além de possuírem um isolamento térmico de modo a impedir perdas de calor para o exterior, possuem também vários equipamentos acoplados, como é o caso de recuperadores de calor. Este equipamento utiliza o calor gerado pelos gases provenientes da combustão de modo a pré aquecer a carga [2].

Em grandes produções é recorrente utilizarem-se fornos contínuos em detrimento dos fornos por lotes. Pois, nestes últimos é necessário uma enorme potência energética para aquecer o forno até que fique operacional. Esta energia de activação do processo é perdida quando o forno é desligado, ao contrário dos fornos contínuos, nos quais não se verificam ciclos de arrefecimento/aquecimento [2].

2.5 - Principais tipos e características dos fornos usados em Fundição

2.5.1 - Fornos de cadinho

Os fornos de cadinho são muito vulgares para a fusão de ligas não ferrosas. São fornos relativamente pequenos, com uma capacidade entre os 30 e os 500 kg. Quando usados para a fusão de ligas ferrosas a sua capacidade diminui drasticamente, situando-se na ordem dos 3 a 50 kg. Estes fornos podem ser classificados, quanto ao tipo de construção, em quatro géneros: cadinho móvel, fixo, basculante e rotativo. Por exemplo, se o forno for fixo, o cadinho é móvel, ou seja, o cadinho é retirado do forno por meio de tenazes. Quanto ao tipo de energia utilizada existem fornos de cadinho a gás, a óleo e eléctricos.

Os cadinhos podem ter várias formas embora, geralmente, a altura seja superior ao diâmetro, sendo a forma mais comum a tronco-cónica. A selecção dos materiais usados no fabrico dos cadinhos requer alguns cuidados, devendo ser considerada a temperatura de fusão do material em que o cadinho é feito. Esta deve ser bastante superior à do material a fundir, devendo também ter uma boa condutibilidade térmica [3].

Nos fornos a óleo, o cadinho assenta numa base feita de material refractário e o calor é fornecido através de um queimador de óleo, como é mostrado na figura 2. Os fornos a gás são em tudo semelhantes, com a diferença que o queimador deve ser adequado ao gás natural. Já nos equipamentos eléctricos, o calor é dissipado por efeito de Joule, utilizando-se normalmente cadinhos metálicos. Estes são bastante usados para fundir ligas de baixo ponto de fusão [3].

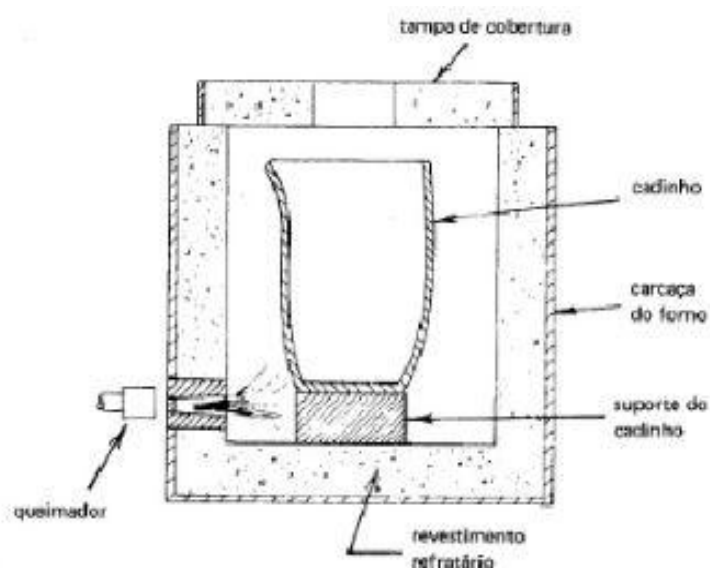


Figura 2 - Forno de cadinho a óleo [2]

2.5.2 - Fornos cilíndricos rotativos ou oscilantes

Estes fornos são aquecidos por combustível, sendo compostos por um cilindro em chapa de aço, como se pode verificar pela figura 3, revestido interiormente por um material refractário. O cilindro é aberto nos topos; de um lado localizam-se os queimadores, enquanto do outro lado faz-se a exaustão dos gases. O cilindro roda em torno de um eixo, só num sentido ou em ambos alternadamente, conforme necessário. A fusão pode dar-se em ambientes oxidantes, neutros ou redutores, conforme o propósito do forno.



Figura 3 - Forno cilíndrico rotativo

2.5.3 - Fornos eléctricos

2.5.3.1 - Fornos aquecidos por arco eléctrico

Estes equipamentos podem ser usados tanto para materiais ferrosos como não ferrosos. O processo de geração de calor é feito através de duas formas; num dos processos o arco é criado entre o eléctrodo e o metal gerando assim calor por irradiação ou por efeito de Joule. Este processo é designado por arco eléctrico directo.

Noutros processos são usados dois ou mais eléctrodos, situados por cima do metal, em que o arco eléctrico é estabelecido entre ambos os eléctrodos. O calor é trocado somente por irradiação, denominando-se este processo por arco eléctrico indirecto. O forno mais usado para metais ferrosos é o de arco eléctrico directo ou de “heroult”, já o forno de arco eléctrico indirecto é mais usual em ligas e metais não ferrosos [3].

2.5.3.2 - Fornos de resistências eléctrica

Estes fornos têm uma ou mais resistências que aquecem por efeito de Joule transmitindo o calor, por condução e radiação, ao material a fundir. Estes fornos dividem-se em dois tipos de aquecimento: Directo ou indirecto.

Nos primeiros as resistências estão dentro da câmara de fusão, transmitindo assim o calor directamente ao material a fundir, enquanto que nos fornos de aquecimento indirecto as resistências estão situadas junto das paredes do forno. São aplicados em fornos de cadinho.

2.5.3.5 - Fornos eléctricos de indução

Estes fornos são constituídos por uma bobina refrigerada, cujo funcionamento se assemelha ao de um transformador primário, gerando correntes induzidas no secundário ou seja, no material a fundir.

São usados essencialmente com o objectivo de fabricar ligas metálicas embora, geralmente, estas tenham que ser previamente aquecidas noutros fornos. Este tipo de fornos subdivide-se em fornos de:

- Baixa frequência cerca de 50 Hz
- Média frequência cerca de 500 Hz
- Alta frequência acima de 5000 Hz

Existem algumas vantagens e desvantagens na utilização de fornos de baixa e de alta frequência, desde logo a agitação é tanto maior, quanto menor for a frequência, originando assim, um menor tempo de vida dos materiais refractários, devido à forte agitação. O funcionamento destes equipamentos é bastante simples, a corrente eléctrica ao circular nas espiras de cobre, em redor do forno, como se pode observar na figura 4, induz no material fortes correntes secundárias que o fazem fundir [4].

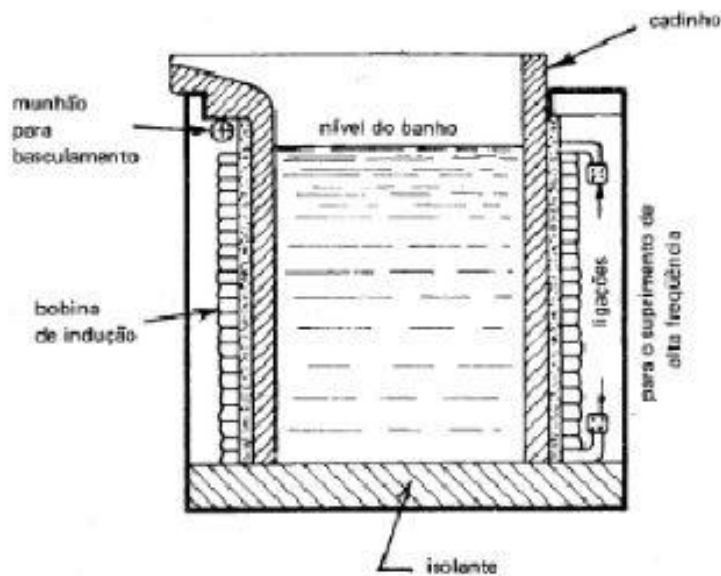


Figura 4 - Forno eléctrico de indução [5]

2.6 - Principais tipos e características de fornos usados em tratamentos térmicos

Os fornos usados em tratamentos térmicos de materiais metálicos podem ser divididos em dois grupos: fornos contínuos (*contínuos furnace*) e fornos por lotes (*batch furnace*). Podem ser aquecidos por queima de combustível, líquido ou gasoso, ou eléctricos. A grande desvantagem dos dois primeiros é a contaminação da atmosfera com os produtos da combustão decorrentes da queima dos combustíveis. Já os sistemas eléctricos têm como desvantagem um tempo de arranque muito maior e, consequentemente, um custo operacional superior.

2.6.1 - Fornos contínuos

Estes equipamentos têm uma enorme importância na indústria metalúrgica e cerâmica pois possibilitam processos contínuos de grande produtividade e repetibilidade. As peças a serem tratadas entram numa extremidade do forno, sendo tratadas ao longo de todo o comprimento do mesmo, sendo posteriormente descarregadas pela outra extremidade.

Estes equipamentos são projectados para executarem um único tratamento térmico e operam a uma temperatura específica, com ou sem atmosfera controlada. São por isso equipamentos bastante dispendiosos, embora a sua grande produtividade torne o investimento rentável a médio/longo prazo. Estes equipamentos podem ser projectados para realizarem tratamentos de recozimento, cementação, tempera, entre outros.

2.6.1.1 - Forno de soleira vibratória

Este sistema é adequado apenas para tratamento de pequenas peças, como parafusos, rolamentos, agulhas, etc. Estes fornos podem ser usados para tratamentos térmicos de endurecimento, têmperas, entre outros, sendo possível realiza-los sob atmosfera controlada. A soleira do forno é vibratória e incorpora um género de serrilha que permite o avanço dos elementos, restringindo o seu recuo.

Os componentes a tratar termicamente são colocados na soleira através de uma tremonha. Estes ao caírem na soleira são movimentados através do movimento vibratório da mesma ao longo do forno, até caírem num tapete imerso num banho à base de óleo, água ou sais, onde se faz a têmpera. Depois de temperados os componentes são transportados através de um tapete rolante para o módulo de lavagem e secagem. A atmosfera protectora dentro do forno assegura o tratamento e acabamento superficial das peças, por exemplo um acabamento brilhante (bright finish) [6].

2.6.1.2 - Fornos contínuos de tabuleiros

Estes equipamentos contínuos são os mais utilizados. Nesta variante as peças a tratar são colocadas em tabuleiros, os quais são empurrados, através de um mecanismo hidráulico ou mecânico, de modo a passar através do forno. Após o aquecimento, poderá existir um estagio onde possa ser feita a têmpera ou, se necessário, um arrefecimento lento, conforme as especificações do processo.

Estes fornos, na sua maioria, são aquecidos a gás podendo também possuir atmosfera controlada, embora neste caso sejam necessárias câmaras de protecção de modo a evitar a presença de ar. São muito utilizados em processos contínuos de endurecimento, têmpera, normalização ou cementação [6].

2.6.1.3 - Forno de tambor rotativo

Este equipamento pode ser usado para diversos tratamentos térmicos de pequenas peças, como parafusos ou rolamentos. Os processos mais comuns neste tipo de fornos são de endurecimento assim como de cementação. O tambor é obtido por fundição e feito de uma liga de níquel-crómio, podendo ser aquecido através de combustível gasoso. O tambor é montado horizontalmente, rodando em torno do eixo horizontal. Geralmente estes fornos são carregados através de uma tremonha [6].

Um veio roscado a todo o comprimento do tambor irá impor um fluxo de carregamento constante. Assim, uma vez que a carga avança a uma velocidade constante, toda a carga é exposta uniformemente á mesma temperatura. Depois de a carga ser aquecida é descarregada numa calha, que ao passar pelo interior de um tanque contendo um líquido, vai ser temperada [6].

Este forno é bastante semelhante ao forno de soleira vibratória, referenciado anteriormente, tendo como principal diferença o mecanismo de avanço das peças no interior do forno. Sendo o mecanismo de avanço do forno de tambor rotativo mais eficiente pois garante que todas as peças avancem a uma velocidade constante.

2.6.2 - Fornos por lotes

2.6.2.1 - Fornos de soleira móvel

Estes equipamentos possibilitam vários tipos de tratamentos térmicos, entre eles, relaxação de tensões, têmpera, processos de revenido e recozimento de aços vazados e forjados. Tem como particularidade o facto de possuir uma soleira móvel, que facilita a carga e descarga do forno, como se pode ver na figura 5. Este dispositivo pode ser carregado manualmente, embora seja usual recorrer-se a uma ponte rolante. Depois da soleira estar carregada esta recolhe para dentro do forno. Usualmente estes equipamentos são utilizados para tratamentos térmicos de peças com grandes dimensões [6].



Figura 5 - Forno soleira móvel [7]

2.6.2.2 - Forno de Mufla

Este forno pode ser usado em tratamentos térmicos de relaxação de tensões, recozimento, cementação, endurecimento de aços de baixa liga entre outros. Este equipamento apenas é usado para tratamentos de peças de tamanho reduzido, o carregamento e descarregamento do mesmo é feito manualmente. O forno tipo mufla consiste basicamente numa câmara de secção rectangular, revestida com tijolos refractários. A geração de calor é feita através de resistências eléctricas incorporadas nas paredes da câmara, como se pode observar na figura 6 [7].

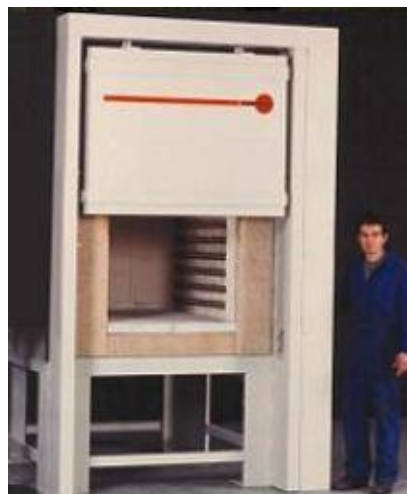


Figura 6 - Forno tipo Mufla [8]

2.6.2.3 - Forno tipo poço

Este forno é constituído por uma câmara de forma cilíndrica, como se pode ver na figura 7, isolada interiormente com material refractário. São fornos normalmente de grandes dimensões sendo, por vezes, encastrados no chão, permitindo uma grande economia de espaço. Podem ser utilizados para inúmeros tratamentos térmicos como por exemplo, endurecimento, recozimento, cementação, entre outros.

Este equipamento tem como grande vantagem, o facto de permitir a redução da deformação de peças longas e finas, como veios metálicos, uma vez que estas podem ser suspensas verticalmente num dispositivo adequado, evitando assim que estejam sujeitas a forças que possam deformá-las. O aquecimento é feito por meio de resistências que estão colocadas em sulcos na parede refractária do forno [6].



Figura 7 - Forno tipo poço [8]

2.6.2.4 - Forno de campânula

Este equipamento é usado me tratamentos de relaxação de tensões, recozimento brilhante, nitruração, normalização brilhante e nitruração iónica. É constituído por uma campânula em forma de sino revestida interiormente por um material isolante. O aquecimento é provido através de resistências eléctricas embutidas nas paredes da campânula, que vão gerar calor por efeito de Joule. Este forno tem um funcionamento bastante particular, uma vez que é usado para servir diversas soleiras, como de pode ver na figura 8. Este processo permite a transferência da campânula de aquecimento de uma soleira para a outra imediatamente após a conclusão do aquecimento. Este forno é dos fornos de lotes o que mais se assemelha aos fornos contínuos, tal como estes tem como grande vantagem o facto de o forno não estar sujeito a constantes ciclos de arrefecimento/aquecimento, não necessitando assim de tanta energia para atingir a temperatura óptima de funcionamento. No entanto tem como grande desvantagem o facto de ocupar bastante espaço [6].



Figura 8 - Forno campânula tipo sino [9]

2.6.2.5 - Fornos de têmpera

2.6.2.5.1 - Têmpera em banho de óleo

São constituídos por um tanque em aço, revestido exteriormente com tijolos refractários, no qual está contido o óleo. O calor é gerado pelas resistências colocadas em ranhuras existentes no material refractário, sendo transferido por condução aos elementos a serem tratados. Este equipamento é adequado para têmperas até 250 °C [6].

2.6.2.5.2 - Têmpera em banho de sais

Estes fornos consistem basicamente num recipiente metálico revestido por um material refractário no qual estão colocados as resistências que irão aquecer o banho de sais por condução de calor. É um equipamento amplamente utilizado em têmperas de aços embora apenas acima dos 150 °C. Em relação aos fornos convencionais usados em têmperas, este processo tem como grande vantagem o facto de os sais fundidos envolverem os componentes a serem tratados promovendo assim, uma elevada taxa de aquecimento [6].

2.6.2.6 - Forno de têmpera por convecção

Neste equipamento a têmpera é realizada com a ajuda de uma corrente forçada de ar, dentro do forno. A facilidade de penetração de calor no interior dos espaços da carga, constitui a grande vantagem deste equipamento. O forno é constituído essencialmente por uma câmara metálica cilíndrica isolada internamente. Este revestimento, para além de isolar termicamente o forno, permite uma reflexão das radiações, de modo a impedir que estas incidam directamente nas peças a tratar termicamente, permite também direccionar o escoamento forçado da forma desejada. O sistema de aquecimento é montado entre as paredes da câmara e o revestimento, enquanto que o ventilador está montado na base da câmara criando assim uma forte corrente de ar no interior do forno. Devido ao próprio *design* do forno a única resistência a esta corrente é oferecida apenas pela própria carga a ser tratada [6].

2.6.2.7 - Forno de eléctrodos emersos em banho de sais

Estes equipamentos são adequados para diversos tratamentos térmicos entre eles: endurecimento, cementação e recozimento. O componente a ser tratado por este forno é imerso num banho de sais fundidos, contidos dentro do próprio forno num recipiente metálico. Vários eléctrodos imersos nesse recipiente originam uma corrente AC que, devido à resistência dos sais á passagem de corrente eléctrica vai gerar calor e assim fundir os sais. Depois de fundidos, os sais são agitados devido a um campo magnético induzido em torno dos eléctrodos, criando assim uma maior homogeneidade de temperaturas dentro do forno.

Este forno é constituído por uma estrutura de aço que envolve uma câmara refractária garantindo assim a protecção da mesma.

Dentro da câmara será colocado o cadinho onde todo o processo se desenrola. Estes recipientes podem ser de material refractário quando se usam sais neutros, isentos de cianeto ou carbonatos, podendo também ser em aço, sendo adequados para tratamentos térmicos de endurecimento e de cementação.

Estes equipamentos têm como grande limitação o facto de, por vezes, os eléctrodos serem incapazes de fundir o sal sólido, sendo previamente necessário recorrer a outros equipamentos [6].

2.6.2.8 - Fornos de vácuo

A grande vantagem deste tipo de fornos em relação aos outros anteriormente descritos é a possibilidade de remover a atmosfera dentro do forno, impedindo a presença de gases activos e proporcionando assim condições de neutralidade, impedindo reacções na superfície dos elementos, como é o caso de reacções de oxidação. Estes equipamentos podem ser usados em tratamentos térmicos de aços e ligas não ferrosas. Estes fornos têm também grande aplicabilidade em tratamentos térmicos de ligas de titânio, muito usadas na indústria aeroespacial. Estas ligas têm uma enorme propensão a contaminações, daí terem de ser tratadas em vácuo [6].

Normalmente os fornos de vácuo são cilíndricos podendo ser construídos horizontal ou verticalmente, sendo o tamanho e a forma dos componentes a serem tratados que determinarão qual o tipo de forno de vácuo mais adequado. Os principais tipos de fornos de vácuo são os fornos de poço, fornos de campânula e os fornos horizontais.

Os dois primeiros apenas diferem dos anteriormente descritos pelo facto de estarem sob vácuo. Os fornos horizontais de vácuo são os mais comuns na indústria metalúrgica, podendo ser do tipo contínuo ou por lotes.

Estes fornos são apropriados para tratamentos térmicos de componentes pesados assim como para operações de brasagem. Quanto ao tipo de aquecimento estes fornos podem ser de parede quente ou de parede fria [6].

Fornos de parede quente possuem o sistema de aquecimento no exterior da câmara de vácuo. Estes equipamentos com este tipo de sistema de aquecimento suportam temperaturas até 900⁰C e são apropriados para têmperas recozimentos e alívios de tensões. Normalmente são fabricados com paredes em aço inox ou em inconel (ligas de níquel crómio e ferro de alta resistência e com excelentes propriedades mecânicas a altas temperaturas), os elementos de aquecimento consistem normalmente em resistências de níquel-crómio. Exteriormente o forno é isolado termicamente com tijolo refractário, sendo este protegido por uma estrutura de aço macio [6].

Fornos de parede fria contêm os elementos de aquecimento dispostos dentro da câmara, sendo auxiliados por escudos de radiação assim como por deflectores de calor de metal refractário, providenciando isolamento e reflexão da radiação. A carga a ser tratada termicamente é colocada no centro do forno numa base de metal refractário, sendo rodeada pelos elementos de aquecimento assim como pelo escudo de radiação.

O forno é constituído por uma estrutura interna, normalmente em aço inox, a qual suporta os elementos de aquecimento, a protecção de radiação e o conjunto de deflectores. Por fim é construída uma carcaça envolvendo todo o conjunto atrás referido, proporcionando uma camisa de água. A maioria dos fornos utiliza as paredes de refrigeração como meio de arrefecer o gás de refrigeração circulante, embora esse arrefecimento possa ser feito através de um permutador de calor externo [6].

2.7 - Fabricantes de fornos industriais

Dados referentes a 2008, mostram que a Alemanha, a Itália e a França são os maiores produtores Europeus de fornos industriais com uma percentagem de 72%, como é possível ver na figura 9.

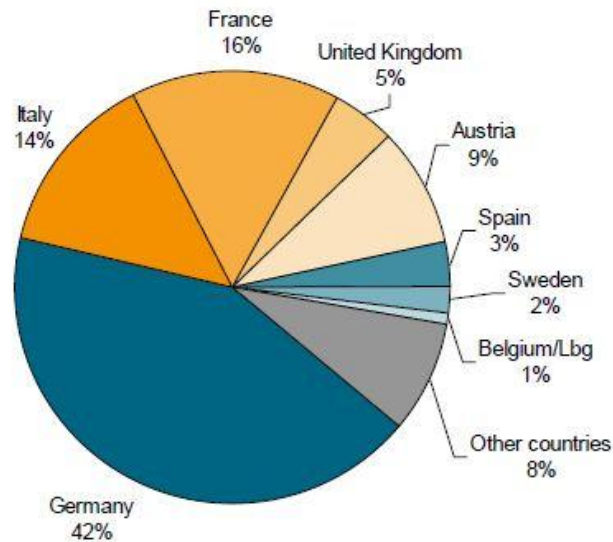


Figura 9 - Principais Países Europeus produtores de fornos industriais [9]

Os Países pertencentes à CECOF (*The European Committee of Industrial Furnace and Heating Equipment Associations*), são os grandes exportadores de fornos mundiais, representando 63% do volume de exportações, como se pode observar na figura 10.

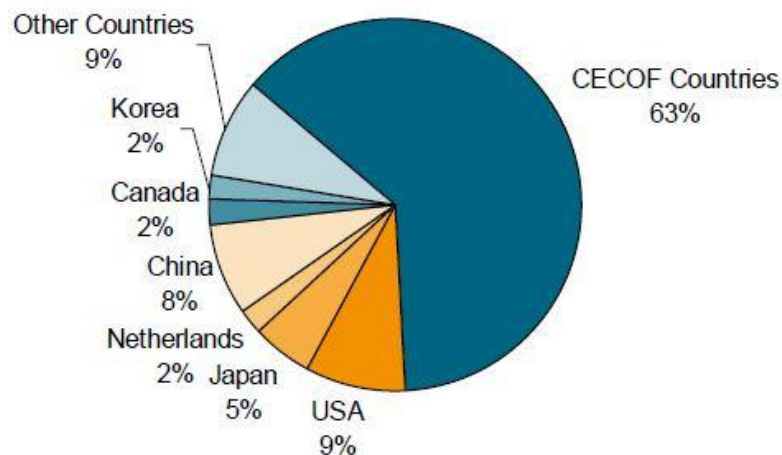


Figura 10 - Principais Países Exportadores de fornos industriais [9]

Nos últimos anos tem havido uma tendência crescente nas exportações por parte de empresas chinesas, em detrimento das empresas Norte Americanas que reduziram para mais de metade o volume de exportações, como se pode observar na figura 11. Na tabela 3 indicam-se algumas das principais empresas, europeias e norte-americanas, produtoras de fornos.

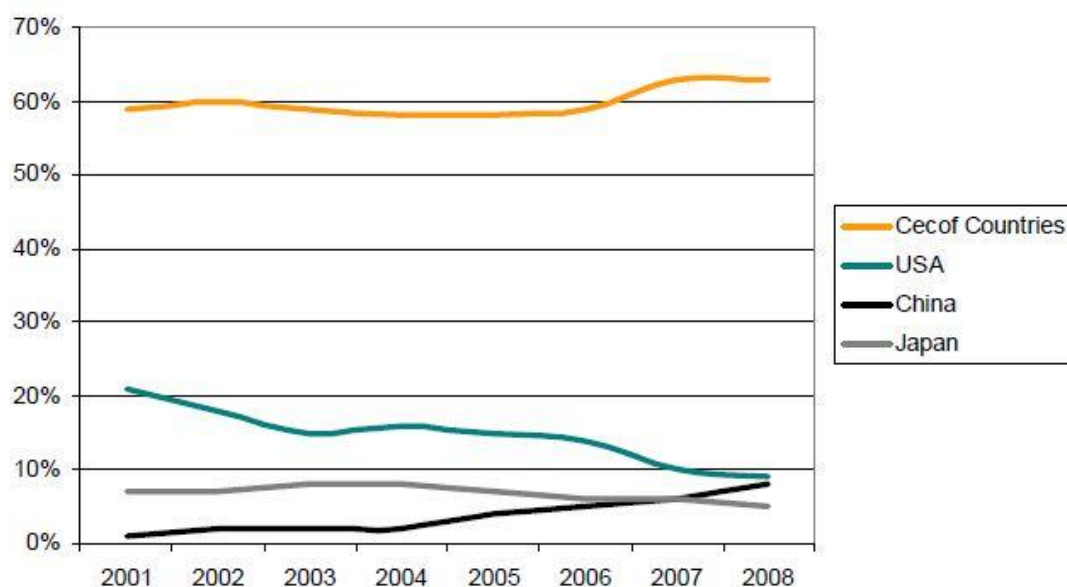


Figura 11 - Evolução nas exportações dos principais países produtores no período de 2001 a 2008, [9]

Tabela 3 - Principais empresas Europeias e Norte Americanas produtoras de fornos industriais

Empresa Produtora	Pais de origem
Despatch Industries, L.P	USA
Wellman Furnaces, Inc	USA
Infratrol Manufacturing corp.	USA
Ipsen	Alemanha
ECM Technologies	França
Thermidor	França
Bouvier Technofour	Bélgica
FOURS H & C SPRL	Bélgica
P.R.A.F.I. SRL	Itália
SOTTRI SRL	Itália

2.8 - Síntese do Capítulo

Neste capítulo fez-se uma abordagem dos principais tipos de fornos industriais utilizados em processos de fundição e tratamentos térmicos, especificando as suas características, vantagens e desvantagens, assim como a gama de aplicações industriais. Tratam-se de equipamentos com uma vasta aplicabilidade nas indústrias metalúrgica, metalomecânica, cerâmica, entre outras.

Nestas aplicações existe um conjunto de factores transversais a todos os processos que não podem ser descurados, citando-se a título de exemplo:

- Custo do equipamento e consumo energético
- Distribuição de Temperaturas ao longo do forno
- Taxas de aquecimento e arrefecimento constantes
- Atmosfera existente no interior do forno
- Cuidados ambientais
- Segurança do operador

Para que estes factores sejam controlados surge a necessidade de ter atenção aos materiais usados na construção do forno, à configuração do próprio forno, assim como à sua instrumentação. Esta deve ser o mais exaustiva possível de modo a fornecer todos os dados relativos à temperatura em diversos pontos do forno em cada instante, e ao tipo de atmosfera utilizada.

Capítulo 3 – Descrição do Projecto

Com o objectivo de aumentar a capacidade do laboratório do NTI, retomou-se o projecto de construção dos fornos. De modo a dar início ao desenvolvimento de ambos os fornos, houve que previamente elaborar um levantamento do material, existente no NTI, relevante para a construção dos fornos. Todo o projecto foi elaborado de modo a aproveitar ao máximo todos os recursos, tanto a nível de materiais, como de equipamentos existentes no NTI.

Ambos os fornos são eléctricos, monofásicos, com uma potência de 12,2 kW. As câmaras destes equipamentos são cilíndricas, abertas nos topos, com diâmetro externo de 450 mm e interno de 205 mm, tendo um comprimento de 530 mm. São compostas apenas por material isolante, fibra cerâmica, composta essencialmente por alumina (Al_2O_3) e Sílica (SiO_2). No interior das câmaras encontram-se as resistências eléctricas, como se pode observar na figura 12 a). Estas são compostas por fio resistivo de 5 mm de diâmetro, de composição 22% Crómio (Cr), 5.8% Alumínio (Al) e Ferro (Fe), com capacidade para atingir temperaturas na ordem dos 1200 °C. De modo a estabelecer a ligação eléctrica, ambas as câmaras estão providas de dois terminais. Estes, não são mais que duas chapas rectangulares (50x20 mm) com um furo de 10 mm de diâmetro na extremidade, onde se fixam os terminais dos cabos provenientes do secundário do transformador. Ambas as câmaras possuem ainda uma tampa, de forma cilíndrica, com 50 mm de espessura, feita do mesmo material isolante, que assegura o isolamento de uma das extremidades do forno, como se pode observar na figura 12 b).

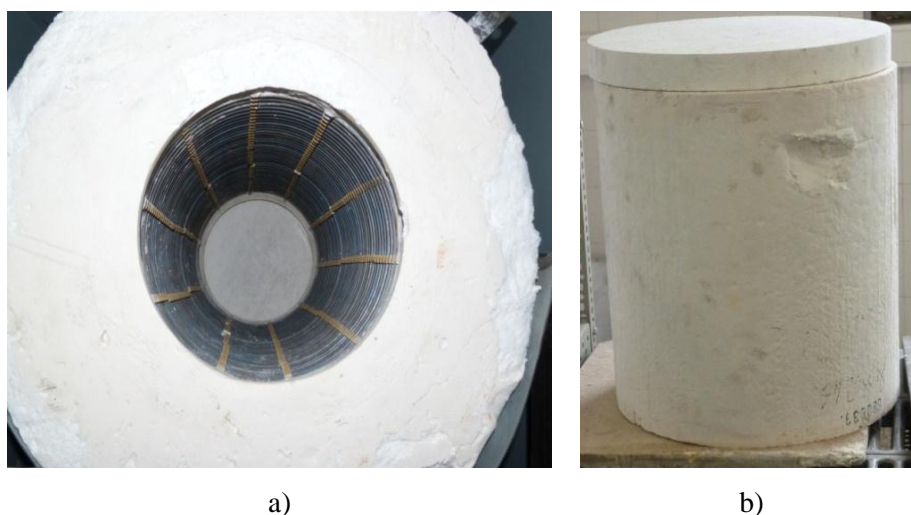


Figura 12 - a) Pormenor das resistências da câmara do forno b) Câmara do forno

Foi previamente criada uma estrutura de suporte de ambos os fornos com a altura necessária para que ambos trabalhassem nas melhores condições, como se mostra na figura 13 a). A altura da estrutura foi imposta pelo forno de fundição, devido ao seu sistema de posicionamento do cadinho, que será abordado no capítulo 3.1. Esta foi feita em construção soldada, recorrendo a perfis rectangulares. Foi também concebida uma plataforma de trabalho, de modo a facilitar a operação com ambos os fornos, como se pode verificar na figura 13 b).



Figura 13 - a) Estrutura de suporte b) Plataforma de Trabalho

3.1 – Projecto e construção do forno de fundição

O projecto e concepção do forno destinado a fundir ligas de baixo ponto de fusão, baseou-se essencialmente no projecto inicial, desenvolvendo-se em quatro fases; construção mecânica da carcaça metálica de protecção, desenvolvimento do sistema de posicionamento do cadinho, verificação do isolamento térmico e, por fim, instalação do sistema de controlo e de potência.

De acordo com o projecto inicial, o forno destinado a fundição de metais com baixo ponto de fusão, foi pensado de modo a ser montado na vertical assente numa base concebida para o efeito (figura 14). A base foi construída num aço de construção, sendo apoiada na estrutura de suporte de ambos os fornos. A base do forno de fundição contém ainda um furo ao centro que deve ser coincidente com o furo da câmara do forno, de modo a facilitar a passagem do sistema de posicionamento do cadinho.



Figura 14 - Base do forno de fundição

Com o objectivo de proteger a câmara do forno, bastante frágil, projectou-se uma carcaça metálica, de forma cúbica, que envolve a câmara. Esta foi construída em chapa de aço e quinada, em forma de "L", formando assim três laterais de um cubo. Este "U" foi soldado à estrutura de suporte dos fornos por soldadura MAG (Metal Active Gás).

Posteriormente cortou-se na guilhotina a quarta lateral ,a que se soldaram, pelo mesmo processo, duas cantoneiras por forma a dar a largura necessária á chapa, assim como, actuarem como aba, de modo a facilitar a montagem. Esta lateral, ao contrário das outras três, é amovível, sendo ligada às restantes através de ligações roscadas, facilitando assim a introdução e remoção da câmara do forno.

A face superior, em chapa, foi cortada na guilhotina e, em seguida feito um furo, com uma serra de corte eléctrica, de diâmetro igual ao diâmetro externo da câmara do forno. Posteriormente, foram soldadas quatro cantoneiras, uma em cada aresta, de modo a conferir uma maior rigidez e também para actuarem como uma aba, para facilitar a montagem. A face superior foi então ligada às restantes faces através de ligações roscadas, como se ilustra na figura 15.



Figura 15 - Pormenor da face superior do forno de fundição

Devido á tampa do forno ser feita do mesmo material isolante que a câmara, houve também a necessidade de criar uma tampa metálica que protegesse a tampa de isolante e que, em simultâneo, garantisse o isolamento da face superior do forno. Assim, inicialmente, projectou-se uma tampa de forma cilíndrica onde o isolante estivesse encastrado. Esta tampa tinha como grande limitação ter a pega próxima da fonte de calor, assim como, o posicionamento da mesma após a sua remoção do forno (figura 16).

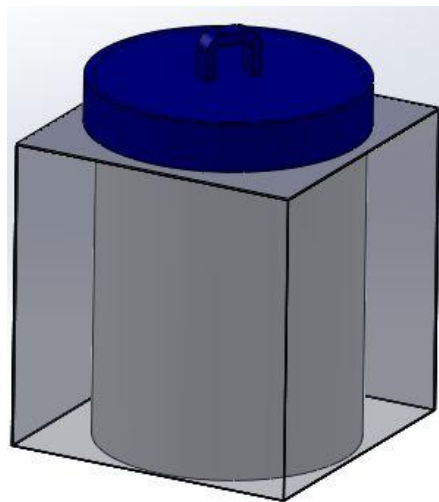


Figura 16 - Projecto Forno fundição, 1ª opção

Por forma a prevenir quaisquer riscos para o operador, desenhou-se uma nova tampa, semelhante á anterior, agora com um braço ligado ao topo da tampa. Este braço possui uma pega no troço vertical do braço, longe da fonte de calor, permitindo levantá-lo e rodá-lo, fazendo o mesmo à tampa.

Com este sistema eliminou-se também o problema de posicionamento da tampa após a sua remoção, pois esta fica suspensa, como se pode ver na figura17.

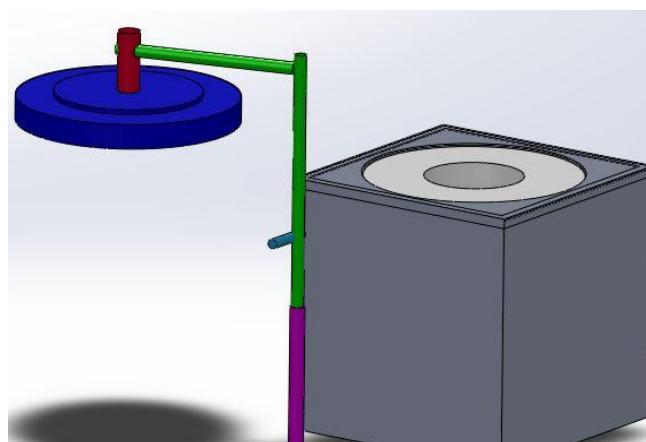


Figura 17 - Projecto da tampa do forno de fundição

A tampa do forno foi construída em chapa. Primeiramente cortou-se um círculo na tesoura de bancada, do diâmetro da tampa de isolante já existente. De seguida soldou-se a MAG uma tira da mesma chapa à volta do círculo, fazendo assim um cilindro onde a tampa de isolante foi encastrada.

De modo a facilitar a remoção da tampa, construiu-se um braço ligado à própria tampa. Este é composto por um tubo vertical soldado a um cotovelo. Na outra extremidade do cotovelo foi soldado um outro tubo, na horizontal que encaixa numa base construída no topo da tampa.

Esta base é composta por uma bolacha, de aço macio, que depois de maquinada no torno foi soldada por MAG ao topo da tampa. Posteriormente soldou-se, também recorrendo a MAG, a esta bolacha um tubo na vertical sendo soldado a este, um outro tubo, este na horizontal, onde encaixa uma das extremidades do braço. Ambos os conjuntos foram ligados através de uma ligação roscada (figura 18 a). A outra extremidade do braço encaixou num outro tubo vertical, soldado à estrutura de suporte dos fornos, permitindo assim que o braço gire livremente. Este braço possui ainda duas pegas, uma sensivelmente a meio do troço vertical e outra na junção entre o braço e a base construída no topo da tampa (figura 18 b).



a)



b)

Figura 18 – Tampa do forno de fundição a) Pormenor da tampa do forno de fundição b) vista geral

De modo a facilitar a remoção do cadinho do forno e a sua introdução sem ocorrer o risco de danificar o isolamento térmico e as resistências eléctricas, projectou-se um sistema de posicionamento hidropneumático, com dois cilindros em série; um cilindro hidropneumático sem haste que funciona como reservatório de óleo e um outro de duplo efeito com haste.

O funcionamento deste sistema é bastante simples, como se ilustra na figura 19. Ao accionar a válvula, o ar comprimido (1), instalado no laboratório do NTI, ao entrar na extremidade inferior do primeiro cilindro (2), faz avançar um êmbolo interno que empurra o óleo hidráulico contido na outra extremidade do êmbolo. Assim o óleo é transferido para outro cilindro, de duplo efeito, promovendo o movimento ascendente da haste. Este movimento deve ser lento e uniforme de modo a assegurar a imobilidade do metal líquido contido no cadinho.

O movimento descendente da haste é feito de forma similar, accionando a válvula em sentido inverso, o ar comprimido (1) entra pela extremidade superior do cilindro de duplo efeito (4) forçando assim o retorno do óleo para o depósito. Simultaneamente, o ar contido no cilindro sem haste é libertado para a atmosfera (3).

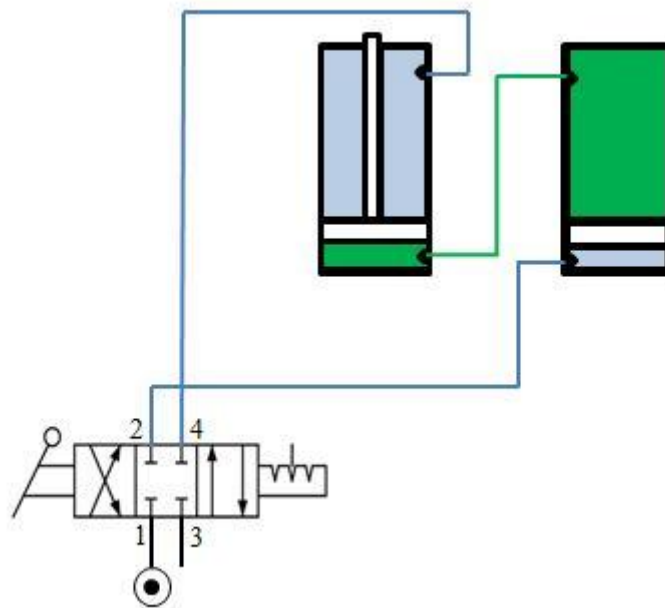


Figura 19 - Esquema do sistema hidropneumático

De modo a fixar ambos os cilindros à estrutura de suporte dos fornos, foi necessário criar duas bases de suporte aos mesmos. Estas foram projectadas e maquinadas de modo a assegurar a ligação entre os cilindros e a própria estrutura.

Maquinou-se também uma base, semelhante às outras duas, a fim de fixar a face superior do cilindro aos perfis superiores previamente soldados, assegurando assim a estabilidade do cilindro de duplo efeito, como se pode observar na figura 20.

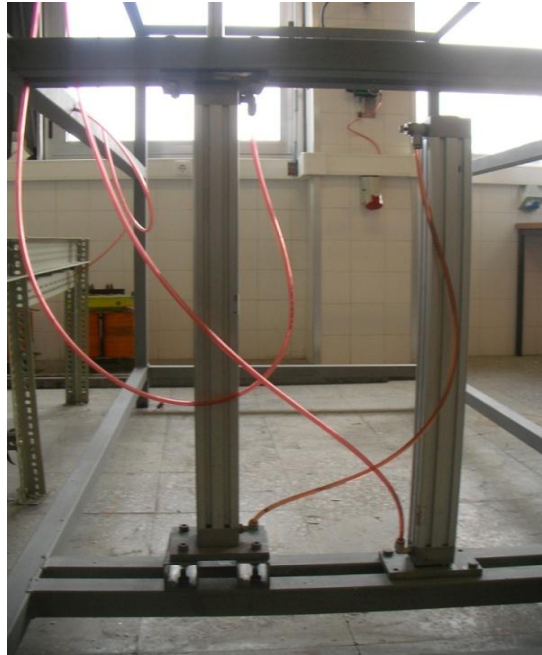


Figura 20 – Sistema hidropneumático de posicionamento do cadinho

Construiu-se também um posicionador do cadinho, como se pode observar pela figura 21, em aço inox 316. Este é unido à haste do cilindro hidropneumático através de uma ligação roscada.



Figura 21 – Posicionador do cadinho

Na figura 22, pode-se observar a introdução do cadinho dentro do forno através deste sistema de posicionamento. Este sistema não só possibilita a introdução e remoção do cadinho sem danificar o forno, mas essencialmente permite que o operador o faça de um modo mais seguro.



a)



b)

Figura 22 - Introdução do cadinho no forno a) Posição inicial b) Posição final

Um factor determinante neste tipo de equipamentos é o modo como estão isolados termicamente. Como foi referido anteriormente, as câmaras destes fornos foram construídas em manta de fibra cerâmica endurecida. Este material oferece uma forte resistência à condução de calor através das paredes do forno, tendo uma condutividade térmica $k = 0,095 \text{ W/m}^\circ\text{C}$.

O isolamento da face superior é assegurado através de uma “bolacha” do mesmo material isolante, com uma espessura de 50 mm e diâmetro igual ao diâmetro externo da câmara. O isolamento da face inferior do forno, em contacto com a base, é garantido por uma placa de fibra cerâmica, de condutividade térmica $k = 0,15 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ com 25 mm de espessura. Esta placa tem exactamente a mesma geometria da base metálica.

Finalmente, o isolamento da extremidade inferior da câmara foi feito através de uma bolacha de isolante situada na face superior do posicionador do cadinho, como se pode ver na figura 23 a). Assim, quando o forno estiver na fase de aquecimento, o cilindro hidropneumático estará na sua posição inicial e, consequentemente, o posicionador ficará fora da câmara do forno, ficando a bolacha de isolante ao nível da placa de isolante assente sobre a base do forno, isolando assim na totalidade a extremidade inferior da câmara, como se pode ver na figura 23 b).



a)



b)

Figura 23 - Isolamento da face inferior da câmara do forno a) Fase de introdução/remoção do cadinho b) Fase de aquecimento

Como estes equipamentos já estavam isolados termicamente, foi necessário verificar analiticamente se o isolamento estava de acordo com o esperado.

A verificação analítica foi feita considerando a temperatura máxima de funcionamento do forno, $T = 800^{\circ}\text{C}$ e assumindo que a temperatura no interior do mesmo é constante. Todos os cálculos efectuados foram feitos considerando que o sistema se encontra em regime permanente. De modo a simplificar os cálculos dividiu-se o problema em três partes distintas; transferência de calor radial pelas paredes do forno, como se exemplifica pela figura 24, e transferência de calor longitudinal, pela tampa e pela placa de isolante da face inferior.

A transferência de calor do interior do forno para o exterior é essencialmente devida à condução através do isolante. Assim pela lei de Fourier (3.1.1), obtém-se a potência térmica dissipada por condução.

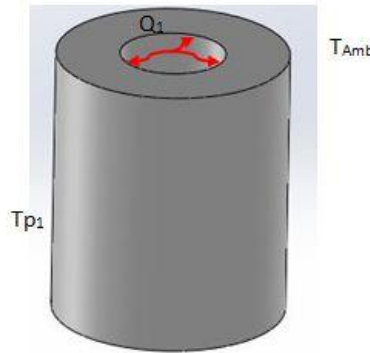


Figura 24 - Transferência de calor radial

Analisando primeiramente a transferência de calor na direcção radial tem-se:

$$Q_{cond} = -k \times A \times \frac{dT}{dx} \quad (3.1.1)$$

Como se trata de um cilindro integraram-se ambos os membros da equação obtendo-se a equação (3.1.2).

$$\int_{r_i}^{r_e} \frac{Q}{A} dr = - \int_T^{T_p} k dT$$

$$Q_{cond} = - \frac{T_p - T}{\frac{\ln(\frac{r_e}{r_i})}{k 2\pi L}} \quad (3.1.2)$$

Considerando que a potência térmica dissipada por condução pela parede interna do forno até à parede externa é igual à potência térmica dissipada por convecção, dada pela equação (3.1.3), para a atmosfera, tem-se:

$$Q_{condução} = Q_{convecção}$$

$$Q_{conv} = h \times A \times \Delta T \quad (3.1.3)$$

Em que h representa o coeficiente de convecção, dado pela equação (3.1.4), por se tratar de cilindro vertical.

$$h = 1,31 \times \Delta T^{\frac{1}{3}} [14] \quad (3.1.4)$$

Assim igualando as expressões (3.1.1) e (3.1.3) obtém-se a temperatura da parede exterior de isolante.

$$\begin{aligned} -\frac{Tp_1 - T}{\frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{k2\pi L}} &= 1,31 \times (Tp_1 - 25)^{\frac{1}{3}} \times 2\pi \times r_e \times L(Tp_1 - T_{Amb}) \\ -\frac{Tp_1 - 800}{\frac{\ln\left(\frac{0,225}{0,1025}\right)}{0,095 \times 2\pi \times 0,53}} &= 1,31 \times (Tp_1 - 20)^{\frac{1}{3}} \times 2\pi \times 0,225 \times 0,53(Tp_1 - 20) \\ Tp_1 &= 90,4^\circ C \end{aligned}$$

Sendo então a potência térmica dissipada radialmente dada pela seguinte expressão:

$$Q_1 = -\frac{Tp - T}{\frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{k2\pi L}} = 285,5 \text{ W}$$

De modo semelhante analisou-se a transferência de calor pela tampa de isolante, assim como pela extremidade inferior do forno (figura 25).

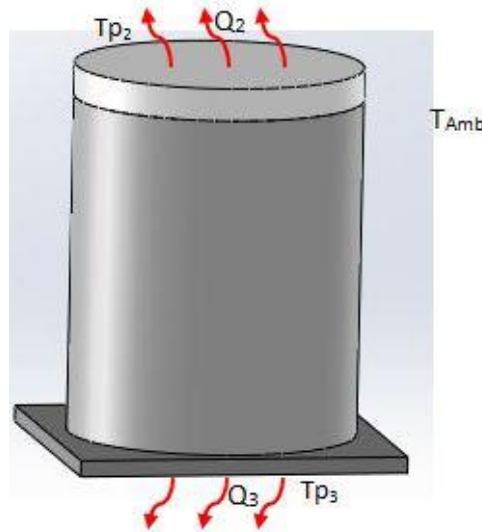


Figura 25 - Transferência de calor longitudinal no forno de fundição

De modo a analisar a potência térmica dissipada pela tampa de isolante desprezou-se a transferência de calor através da espessura da mesma, devido à área desta ser bastante menor que a área da superfície. Assim, analisando a tampa de isolante tem-se:

$$Q_{condução} = Q_{convecção}$$

Em que o coeficiente de convecção é dado pela equação (3.1.4).

Igualando as expressões (3.1.1) e (3.1.3) tem-se então a temperatura da superfície da tampa de isolante.

$$\begin{aligned} Q_{cond} &= -k \times A \times \frac{\Delta T}{\Delta x} \\ -k \times A \times \frac{(Tp - 800)}{\Delta x} &= h \times A \times (Tp - Tamb) \\ -0,095 \times \pi \times 0,1025^2 \times \frac{(Tp_2 - 800)}{0,05} &= 1,31(Tp_2 - 20)^{\frac{1}{3}} \times \pi \times 0,225^2 (Tp_2 - 20) \\ Tp_2 &= 76,7^\circ C \end{aligned}$$

Consequentemente calculou-se a potência térmica dissipada pela tampa de isolante

$$Q_2 = -0,095 \times \pi r_i^2 \times \frac{(76,7 - 800)}{0,05} = 45,4 W$$

Por último verificou-se a transferência de calor pela extremidade inferior do forno

$$Q_{condução} = Q_{convecção}$$

Assim igualando as expressões (3.1.1) e (3.1.3) e tendo em conta que o coeficiente de convecção é dado pela expressão (3.1.5), por se tratar de uma placa horizontal com a face aquecida voltada para cima, obtém-se a temperatura da parede exterior de isolante, Tp_3 .

$$\begin{aligned} h &= 1,52 \times \Delta T^{\frac{1}{3}} \quad (3.1.5) \\ -k \times A \times \frac{(Tp - 800)}{\Delta x} &= h \times A \times (Tp - Tamb) \\ -0,15 \times \pi \times 0,1025^2 \times \frac{(Tp_3 - 800)}{0,025} &= 1,52(Tp_3 - 20)^{\frac{1}{3}} \times \pi \times 0,225^2 (Tp_3 - 20) \\ Tp_3 &= 133^\circ C \end{aligned}$$

Estando assim em condições de calcular a potência térmica dissipada pela extremidade inferior do forno.

$$Q_3 = -0,15 \times \pi r_i^2 \times \frac{(133 - 800)}{0,025}$$

$$Q_3 = 132 \text{ W}$$

Assim, calculou-se a potência térmica perdida através das paredes do forno.

$$Q_{Total} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 462,9 \text{ W}$$

Pode-se concluir que em regime permanente a maior taxa de energia dissipada pelo forno, é através da parede cilíndrica da câmara, como seria de se esperar, pois a área de condução térmica é bastante superior à dos restantes elementos. Na face exterior de isolante da base do forno regista-se a temperatura mais elevada, pois a espessura de isolante é bastante menor que a espessura da tampa e da própria câmara.

3.2 – Projecto e construção do forno de tratamentos térmicos

Tendo em conta alguns requisitos impostos pelos processos de tratamentos térmicos a efectuar neste forno, optou-se por construí-lo na posição horizontal de modo a obter um gradiente de temperatura mais uniforme ao longo de todo o forno. Outra vantagem bastante significativa é o aumento considerável da área útil disponível no interior do mesmo.

Devido a este forno ter sido construído na horizontal houve a necessidade de projectar uma estrutura de suporte para a câmara do forno, assim como para a tampa de isolante do mesmo. Esta foi projectada não só com a finalidade de suportar a câmara do forno, mas também com a finalidade de permitir o isolamento da face posterior da câmara, como se pode ver na figura 26.

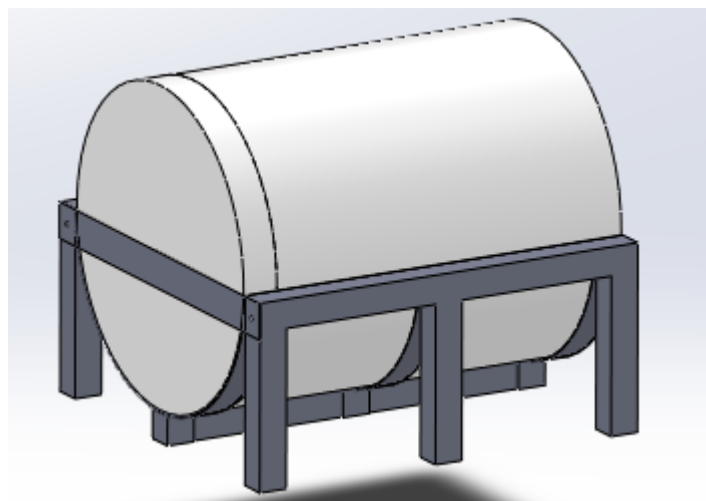


Figura 26 - Estrutura de suporte da câmara do forno

Assim, recorrendo a perfis de secção rectangular existentes no laboratório do NTI, fez-se uma estrutura em construção soldada, utilizando o processo de soldadura MAG. As cintas onde o forno assenta, são em chapa, soldadas pelo mesmo processo à estrutura.



Figura 27 - Estrutura e suporte da câmara do forno

Esta base, como se pode observar na figura 27, tem exactamente o comprimento do conjunto da câmara do forno mais a tampa de isolante colocada na face posterior do forno. De modo a assegurar que a tampa de isolamento esteja justa á câmara do forno foi colocada uma barra de aço, ligada à base do forno através de duas ligações roscadas. Também foi colocada uma barra semelhante a esta mas em aço inox, na face anterior da câmara, de modo a conferir o aperto necessário ao conjunto.

Por forma a proteger a câmara do forno, projectou-se uma carcaça metálica, muito semelhante à de uma mufla, de modo a envolver toda a câmara do forno. Esta é composta por quatro elementos: uma base, uma tampa posterior, uma tampa frontal e por fim, um "U" que completa toda a carcaça de protecção. Todos os componentes foram construídos em chapa de aço (figura 28).



Figura 28 - Forno de Tratamentos térmicos em fase de construção

A porta do forno foi obtida a partir de uma chapa cortada na guilhotina e quinada por forma a criar uma aba em todo o perímetro da porta. Recorrendo a um tubo de secção rectangular, depois de cortado e soldado por MAG, criou-se uma moldura, a qual foi soldada á chapa já existente para a porta. Esta moldura foi feita com o objectivo de conferir uma maior rigidez à porta.

Com a finalidade de tornar a porta o mais estanque possível, foi colado, com mástique refractário, uma fita de fibra de vidro em todo o perímetro da moldura. Por fim, colou-se, também com mástique refractário, uma placa de fibra cerâmica à chapa, de condutividade térmica $k = 0,15 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, de modo a isolar a porta, nivelando assim a altura da moldura com o isolamento (figura 29 a). Colocou-se também, como se pode ver na figura 29 b), um puxador e dois fechos que providenciam o aperto necessário entre a porta e todo o restante conjunto, minimizando assim as perdas de calor pela porta.



a)



b)

Figura 29 – Porta do forno a) Vista posterior b) Vista frontal

Ao contrário do forno anteriormente descrito, este foi desenhado de modo a ser alimentado manualmente, através de um tabuleiro em aço inox 304. Este foi construído a partir de uma chapa, cortada e quinada, por forma a obter uma aba ao longo de todo o seu perímetro, foi soldado uma argola, também de aço inox, na aba frontal do tabuleiro, de modo a permitir a sua remoção do forno (figura 30).



Figura 30 - Tabuleiro de posicionamento das amostras

Houve assim a necessidade de encontrar uma solução que assegurasse o suporte do tabuleiro, bem como das amostras a serem tratadas, sem que ocorresse o risco de danificar as resistências do forno (figura 31).

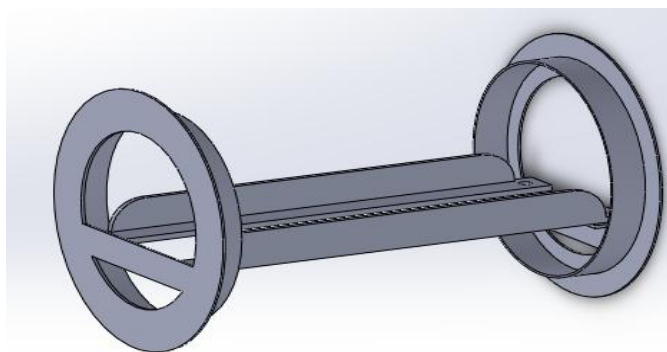


Figura 31 - Projecto da estrutura interna do forno

A solução encontrada consistiu numa estrutura composta por dois elementos; a estrutura principal e um anel de fixação, como se pode observar na figura 31. O primeiro elemento consiste em duas cantoneiras que asseguram o suporte e têm a função de guias do tabuleiro. Estes estão ligados a dois anéis que foram desenhados de modo a encaixarem na "boca" do forno, sendo um coincidente com a face frontal do forno de modo a impedir que a estrutura escorregue para dentro do forno, enquanto o outro é coincidente com a face interna do forno de modo a distribuir os esforços radialmente.

O segundo elemento tem apenas a função de suporte da estrutura, sendo constituído por dois anéis idênticos aos anteriormente descritos, assim como por uma chapa onde a estrutura assenta de modo a evitar quaisquer deslizamentos da estrutura sobre o anel de fixação. Devido a limitações financeiras não foi possível fabricar esta estrutura no material mais indicado, assim recorreu-se a um aço inox 316 L, pois foi o material com melhor relação preço/desempenho encontrado.

A instalação da estrutura dentro do forno é bastante simples, sendo a estrutura principal, acima descrita, instalada pela “boca” do forno encaixando no anel de fixação montado pela face posterior do forno, tal como se ilustra na figura 32.

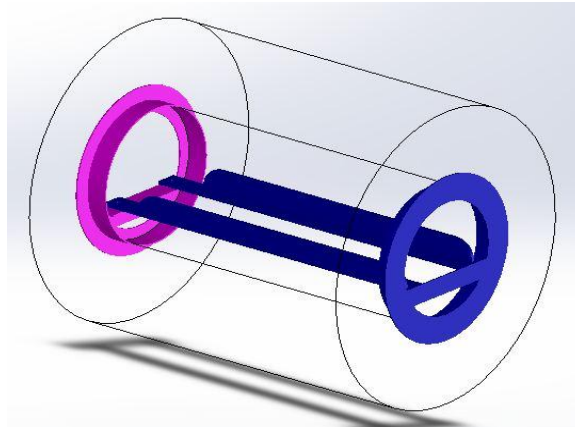


Figura 32 - Câmara do forno com estrutura interna instalada

Devido a estar sujeita a altas temperaturas, aproximadamente 800 °C, e suportar o peso do tabuleiro com as amostras a serem tratadas termicamente, assim como o peso das guias, houve que dimensionar a estrutura à fluência. Considerando que:

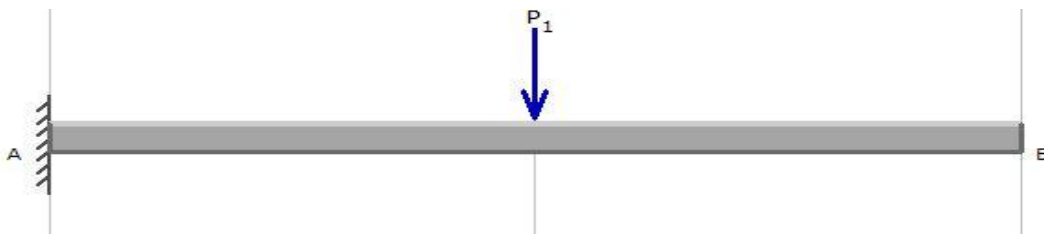
Massa do tabuleiro – 3kg

Massa das amostras – 2kg

Massa das guias -1kg

Peso - $(3 + 2 + 1) \times 9,81 = 58,86N$

O peso do conjunto tabuleiro/amostras assim como das guias é suportado por 2 barras, assim cada barra suporta uma carga de 29,5N.



Assumindo que a estrutura apenas está encastrada em A, desprezando assim a componente vertical da reacção em B, de modo a facilitar os cálculos, tem-se um momento flector de:

$$M = 29,5 \times 0,25 = 7,4 \text{ N.m}$$



A tensão máxima ocorre na secção de encastramento, sendo calculada através da expressão (3.2.1).

$$\sigma_{xx} = \frac{M \times z}{I} \quad (3.2.1)$$

Sendo o momento de inércia para uma secção rectangular dado pela equação 3.2.2,

$$I = \frac{ab^3}{12} \quad (3.2.2)$$

Para um Aço Inox 316 L a 871 °C tem-se uma tensão de cedência de 110 MPa, como se pode observar na tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades do Aço Inox 316 a elevadas temperaturas [10]

Temperature °F (°C)	UTS ksi (MPa)	0.2% YS ksi (MPa)	Elongation % in 2" (50.8 mm)
400 (204)	81.0 (558)	35.0 (241)	51
600 (316)	78.0 (538)	31.0 (214)	48
800 (427)	76.0 (524)	27.5 (190)	47
1000 (538)	70.0 (483)	24.0 (165)	44
1200 (649)	57.0 (393)	21.0 (145)	40
1400 (760)	35.0 (241)	18.0 (124)	37
1600 (871)	24.0 (165)	16.0 (110)	44

Aplicando um coeficiente de segurança $n=1,5$ tem-se uma tensão admissível de 73,3 MPa. Fixando a espessura da barra pretendida em 5 mm dimensionou-se então a largura da mesma recorrendo às equações (3.2.1) e (3.2.2).

$$73,3MPa = \frac{7.4 \times 2.5 \times 10^{-3}}{\frac{a \times (5 \times 10^{-3})^3}{12}}$$

Obteve-se então uma largura mínima de $a = 24 \text{ mm}$. Tendo em conta que esta medida não é uma medida *standard*, adquiriu-se no mercado uma barra de aço inox 316L de secção $30 \times 5 \text{ mm}$, construindo-se a estrutura de suporte do tabuleiro, como se pode observar na figura 33.

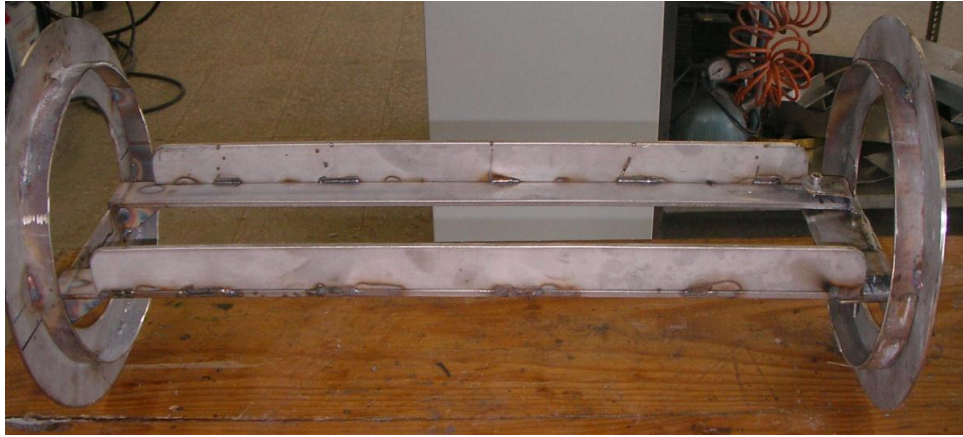


Figura 33 - Estrutura interna do forno de tratamentos térmicos

Como foi referido anteriormente, esta estrutura é composta basicamente por dois elementos, a estrutura principal, no lado esquerdo da imagem e uma estrutura de fixação do lado direito.

Ambos os elementos possuem dois anéis, soldados um ao outro por TIG. O primeiro foi obtido a partir de uma chapa de aço Inox 304, existente no laboratório do NTI, depois de cortada na tesoura de bancada em forma de disco e rectificado no torno. Também no torno fez-se um furo, produzindo assim os dois anéis exteriores, como se pode ver na figura 34.



Figura 34 - Anéis de Aço Inox

Os dois anéis interiores foram obtidos através de um tubo de aço inox, de diâmetro superior ao pretendido, já existente no laboratório, onde apenas foi preciso cortar e em seguida soldar por TIG, de modo a obter o diâmetro desejado.

A estrutura principal contém duas cantoneiras, feitas a partir de uma barra de aço inox 316, que depois de cortada foi soldada em vários pontos, utilizando TIG. Estas cantoneiras foram soldadas também por TIG a uma chapa de aço inox, previamente soldada ao anel exterior.

Na outra extremidade as cantoneiras são presas ao anel de fixação recorrendo a dois pinos de aço inox. Devido à dilatação da estrutura os furos onde o pino atravessa as cantoneiras foram rasgados na fresa de modo a não ocorrer qualquer restrição do movimento decorrente da dilatação da estrutura. Estas estão assentes num "L" em Aço Inox, soldado por TIG ao anel exterior, como se pode observar pela figura 35 a) tendo também duas chapas, de aço inox, dobradas de modo a impossibilitar qualquer movimento ascendente das cantoneiras, decorrente da dilatação da estrutura, como se pode observar pelas figuras 35 b).



a)



b)

Figura 35 - a) Anel de fixação da estrutura b) Pormenor dos pinos de fixação

Devido a este forno ter sido adaptado por forma a executar tratamentos térmicos, surgiu a necessidade de reformular todo o isolamento térmico. Como foi referido anteriormente, a estrutura de suporte do forno, não só foi projectada de modo a suportar a câmara, mas também de modo a assegurar o isolamento da face posterior do forno. Esta é isolada através de uma “bolacha” do mesmo material da câmara do forno, de condutividade térmica $k = 0,095 \text{ W/m}^0\text{C}$ e com uma espessura de 50 mm e de diâmetro igual ao diâmetro externo da câmara.

O isolamento da face anterior do forno é providenciado através de três placas de fibra cerâmica, de condutividade térmica $k = 0.15 \text{ W/m}^0\text{C}$, perfazendo uma espessura de 70 mm . As duas primeiras contêm um rasgo igual ao rasgo da tampa frontal, sendo o rasgo da terceira placa bastante menor, apenas do tamanho da "boca" do forno.

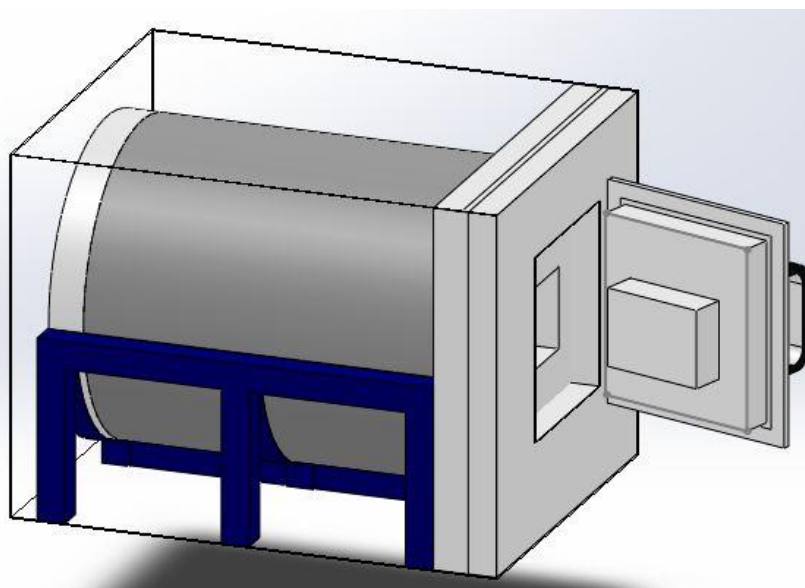


Figura 36 - Forno de Tratamentos Térmicos

Na porta está embutido um bloco de isolante com a espessura das três placas e com a forma dos rasgos das mesmas, de forma a isolar totalmente a face anterior do forno, como se pode observar na figura 37.



a)



b)

Figura 37 – a) Forno de Tratamentos térmicos b-)Pormenor do tabuleiro de posicionamento das amostras

De forma a calcular a potência térmica perdida pelas paredes do forno, estudou-se o comportamento térmico do mesmo. Os cálculos foram efectuados considerando o forno a trabalhar à temperatura máxima $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$, em regime permanente e, assumindo que esta é constante ao longo de todo o forno.

De forma semelhante ao forno anteriormente descrito começou-se por estudar a transferência de calor radial, pelas paredes do forno, ilustrada na figura 38.

Este cálculo é idêntico ao do forno anterior, em que a única diferença reside no coeficiente de convecção pois, neste caso a câmara do forno está na horizontal. Assim tem-se um coeficiente de convecção dado pela equação (3.2.3).

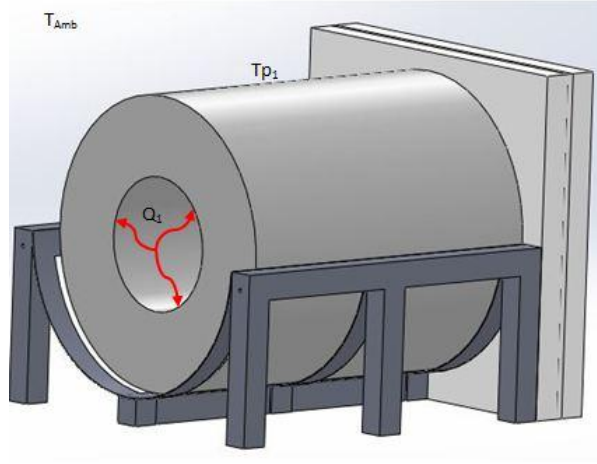


Figura 38 - Transferência de calor radial no forno de Tratamentos térmicos

$$Q_{condução} = Q_{convecção}$$

Igualando as equações (3.1.1) e (3.1.3) obteve-se a temperatura da parede exterior da câmara do forno.

$$h = 1,24 \times \Delta T^{\frac{1}{3}} [15] \quad (3.2.3)$$

$$-\frac{Tp - T}{\frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{k2\pi L}} = 1,24 \times (Tp - T_{amb})^{\frac{1}{3}} \times 2\pi \times r_e \times L(Tp - T_{amb})$$

$$-\frac{Tp - 800}{\frac{\ln\left(\frac{0,225}{0,1025}\right)}{0,095 \times 2\pi \times 0,53}} = 1,24 \times (Tp - 20)^{\frac{1}{3}} \times 2\pi \times 0,225 \times 0,53(Tp - 20)$$

$$Tp = 93,2^\circ C$$

Sendo então a potência térmica dissipada radialmente dada pela seguinte expressão.

$$Q_1 = -\frac{Tp - T}{\frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{k2\pi L}} = 281,7 W$$

De seguida calculou-se a transferência de calor longitudinalmente, através da “bolacha” de isolante colocada na face posterior do forno assim como através das placas isolantes colocadas na face frontal do mesmo, como se ilustra na figura 39.

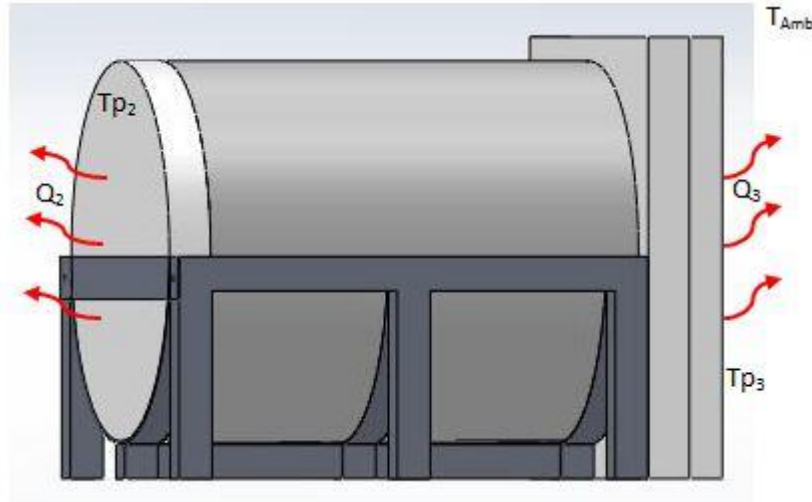


Figura 39 - Transferência de calor longitudinal no forno de tratamentos térmicos

Primeiramente calculou-se a transferência de calor pela “bolacha” de isolante colocada na parte posterior do forno. De forma análoga à anterior calculou-se então a temperatura da superfície exterior do isolante. Igualando as expressões (3.1.1) e (3.1.3) obteve-se:

$$Q_{\text{condução}} = Q_{\text{convecção}}$$

$$-k \times A \times \frac{(Tp_2 - 800)}{\Delta x} = h \times A \times (Tp_2 - T_{\text{amb}})$$

Em que o coeficiente de convecção é dado pela expressão (3.2.4), por se aproximar a uma placa na vertical.

$$h = 1,31 \Delta T^{\frac{1}{3}} [15] \quad (3.2.4)$$

$$-0,095 \times \pi \times (0,1025)^2 \times \frac{(Tp_2 - 800)}{0,05} = 1,31(Tp_2 - 20)^{\frac{1}{3}} \times \pi \times (0,225)^2 \times (Tp_2 - 20)$$

$$Tp_2 = 76,7^\circ C$$

Consequentemente calculou-se, pela expressão (3.1.1), a potência térmica dissipada pela “bolacha” de isolante colocada na face posterior do forno.

$$Q_2 = -0,095 \times \pi \times (0,1025)^2 \times \frac{(76,7 - 800)}{0,05} = 45,3 \text{ W}$$

Por fim calculou-se a transferência de calor pelas placas isolantes, colocadas na face frontal do forno. De forma idêntica ao cálculo anterior, determinou-se a temperatura na superfície das placas isolantes, Tp_3 .

$$-k \times A \times \frac{(Tp - 800)}{\Delta x} = h \times A \times (Tp - Tamb)$$

$$-0,15 \times \pi \times 0,1025^2 \times \frac{(Tp_3 - 800)}{0,095} = 1,31(Tp_3 - 20)^{\frac{1}{3}} \times 0,42^2(Tp_3 - 20)$$

$$Tp_3 = 66,1^\circ C$$

A potência térmica dissipada pela face frontal de isolante é então:

$$Q_3 = -0,15 \times \pi \times (0,1025)^2 \times \frac{(66,1 - 800)}{0,095} = 38,25 \text{ W}$$

Assim, pode-se em calcular a potência térmica total, dissipada pelo forno.

$$Q_{Total} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 365,25 \text{ W}$$

Como era de esperar verifica-se uma menor potência térmica dissipada no forno de tratamentos térmicos (365 W) em comparação com o forno de fundição (462,9 W). Esta diferença deve-se sobretudo ao forno de fundição estar pouco isolado na extremidade inferior em comparação com a porta do forno de tratamentos térmicos, em que as perdas térmicas são respectivamente de 132 W e 66,1 W. A potência dissipada pela câmara do forno de fundição é bastante semelhante à potência dissipada pela câmara do forno de tratamentos térmicos, o mesmo acontecendo pela bolacha de isolante que constitui a tampa do forno de fundição, e a face posterior do forno de tratamentos térmicos.

3.3 - Projecto e instalação do sistema de potência e controlo dos fornos

O circuito eléctrico de ambos os fornos é bastante semelhante, estando dividido em duas partes distintas, embora interligadas; circuito de potência e circuito de controlo. Sendo o primeiro responsável pela alimentação do forno, e o segundo, pelo controlo do circuito de potência, impondo assim maiores ou menores taxas de aquecimento e de arrefecimento.

Ambos os fornos estão dotados de um controlador de temperatura programável de pequenas dimensões, apropriado para o controlo de variações de temperaturas e de patamares isotérmicos. Estes controladores programáveis utilizam a lógica de controlo PID.

Estes recebem a informação da temperatura no forno em cada instante, por meio de um termopar e actuam sobre os reguladores de potência que condicionam a potência fornecida pelo secundário do transformador aos terminais do forno.

Ambos os fornos trabalham com um transformador monofásico de 12,2 kW de potência, recebendo 220 V no primário e impondo uma tensão, de no máximo, 163 V aos terminais do forno.

Todo o sistema eléctrico dos fornos foi colocado num painel de controlo, adaptado a partir de um armário já existente no laboratório, criando duas zonas distintas. Na parte superior estão embutidos os controladores e toda a parte de segurança do sistema, assim como um comando de corte geral, como se pode observar na figura 40. Na parte inferior estão colocados os reguladores de potência. Devido a estes equipamentos aquecerem bastante surgiu a necessidade de potenciar a convecção. Para isso e, aproveitando alguns furos existentes nas faces laterais, fez-se uma grelha de respiração na parte inferior do armário.



a)



b)

Figura 40 – Painel de controlo a) Vista geral b) Pormenor do comando de corte geral de corrente

3.3.1 - Sistema de Controlo e Potência do forno de Tratamentos Térmicos

O controlo da temperatura do forno é feito por meio de um controlador programável PID (RKC REX P-300), ilustrado na figura 41. Este ao receber informação da temperatura do forno, através de um termopar (Input), fornece uma resposta, em corrente contínua, de 0 a 5 V (output) para um tiristor (425 A) "*phase angle*" que controla o primário do transformador, condicionando assim a potência disponível no secundário e, conseqüentemente, a potência disponível para o forno eléctrico. No anexo A1 apresenta-se de forma simplificada o procedimento de programação deste controlador.



Figura 41 - Controlador REX-P300

O tiristor utilizado é monofásico alimentado à tensão de 220V (figura 42) e tem como objectivo regular a potência a fornecer ao forno, consoante o maior ou menor valor da resposta em corrente continua, dada pelo controlador, de 0 a 5 V.

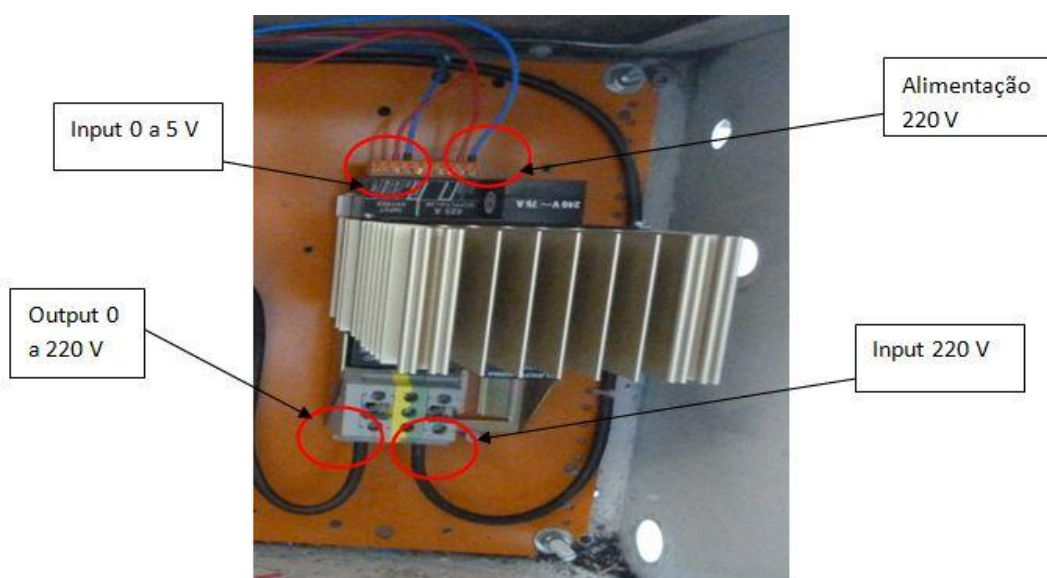


Figura 42 - Tiristor 425 A

Na figura 43, encontra-se esquematizado o funcionamento de todo o sistema de controlo e potência do forno de tratamentos térmicos.

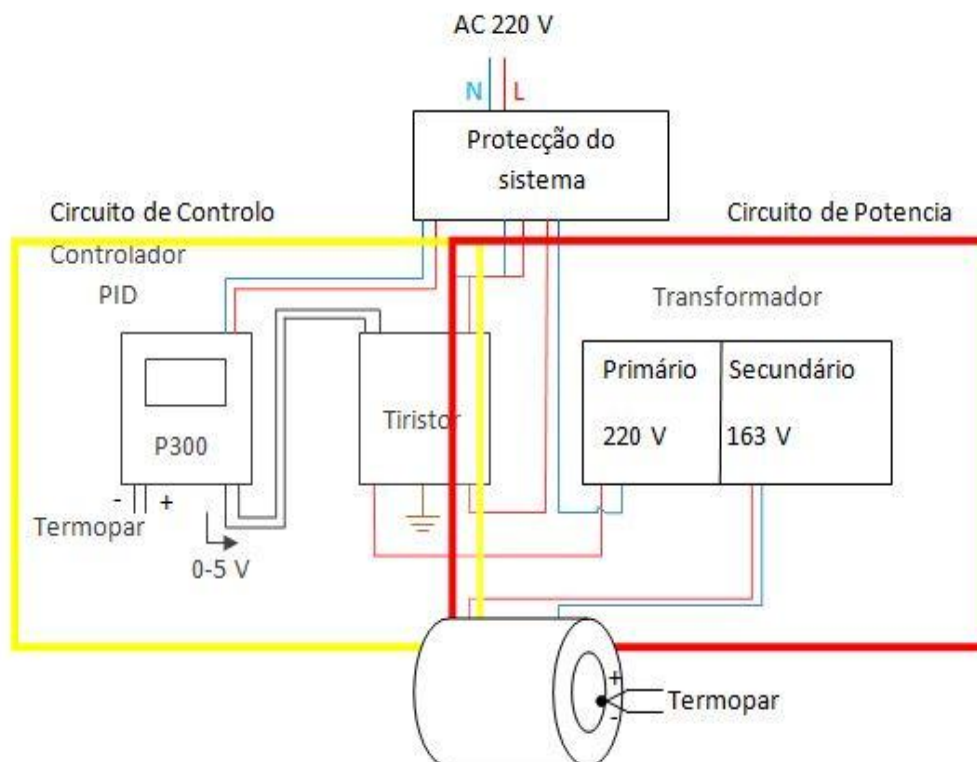


Figura 43 – Esquema dos circuitos de controlo e potência do forno de tratamentos térmicos

3.3.2 - Sistema de Controlo e Potencia do forno de Fundição

O controlo de temperatura do forno de fundição é bastante semelhante ao anteriormente descrito. Este é feito por meio de um controlador programável PID (RKC REX P-96), como se pode observar pela figura 44, diferente do descrito anteriormente, mais simples e menos preciso. Por essa razão foi utilizado no forno de fundição, pois é um processo que requer menos precisão. No anexo A2 apresenta-se de forma simplificada as instruções de programação deste controlador.



Figura 44 - Controlador REX-P96

O controlador ao receber informação da temperatura através de um termopar (input), envia uma resposta, em corrente contínua, de 4 a 20 mA para dois relés de estado sólido montados em paralelo que funcionam como condicionadores de potência, controlando assim o primário do transformador e, conseqüentemente, o secundário ligado aos terminais do forno.

Com estes relés de estado sólido, (figura 45), não é possível ter o mesmo controlo sobre a potência do que com o tiristor, anteriormente descrito. Na figura 47 encontra-se esquematizado o circuito de potência e de controlo do forno de fundição.



Figura 45 - Relés de Estado sólido

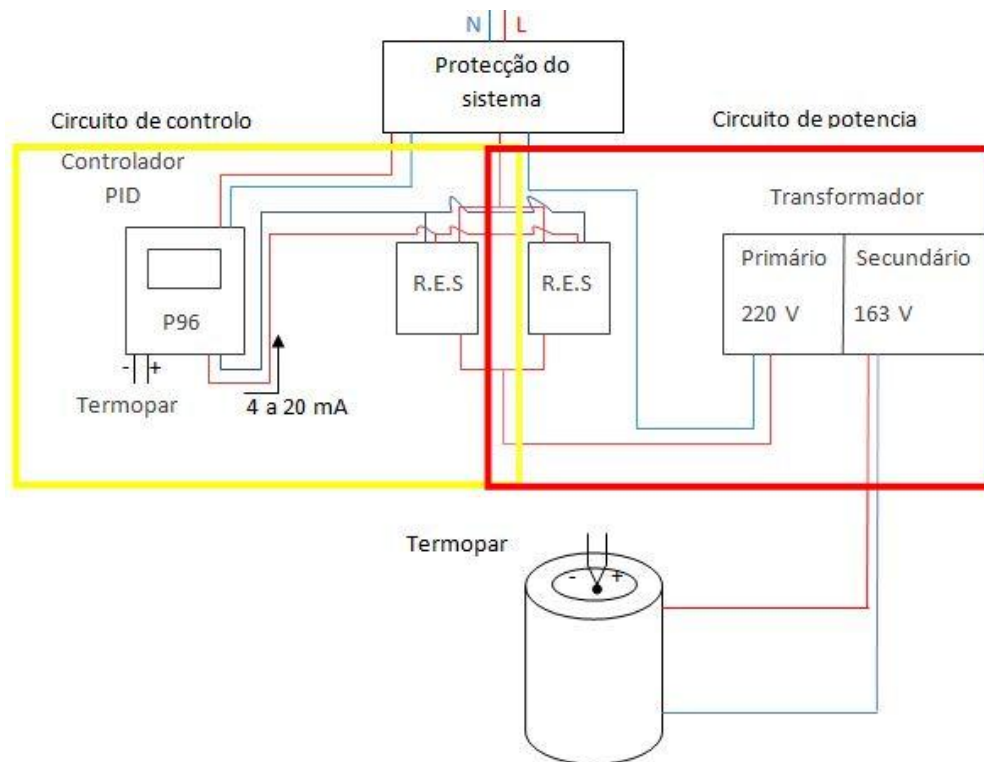


Figura 46 - Esquema dos circuitos de controlo e potência do forno de fundição

3.4 – Instrumentação

Depois de montado o equipamento, caracterizou-se o comportamento térmico de ambos os fornos, medindo as taxas de aquecimento e de arrefecimento, assim como o perfil térmico no interior dos mesmos.

Para isso utilizou-se como instrumentos de medição termopares tipo K, construídos no NTI, em fio Cromel-Alumel de 0,5 mm de diâmetro. A construção destes instrumentos é bastante simples. Os fios Cromel-Alumel foram enfiados em cânulas cerâmicas, de 3 mm de diâmetro, com dois furos, sendo a junção quente formada torcendo os dois fios Cromel-Alumel (positivo e negativo), unindo-os por fusão, formando a cabeça do termopar. A outra extremidade dos fios Cromel-Alumel (junção fria) foi ligada ao cabo de compensação tipo k, tendo tido o cuidado de não inverter a polaridade. O cabo de compensação tem a finalidade de transportar a força electromotriz (FEM) sem perdas até aos instrumentos de medição situados longe dos fornos.

Por forma a adquirir temperaturas em vários pontos do forno utilizou-se o *software* e *hardware* da *National Instruments*. Foram utilizados dois módulos (NI 9211) de aquisição de temperaturas, assim como um chassi (NI Cdaq-9178). Na figura 47, ilustra-se o equipamento utilizado para a aquisição de dados.

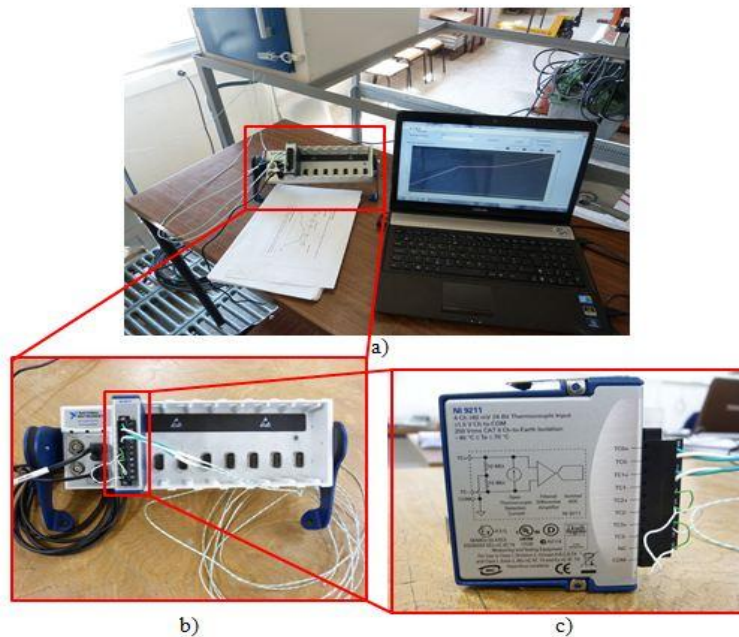


Figura 47 - a) Equipamento para aquisição de dados b) Chassi (NI Cdaq-9178) c) Módulo de aquisição de temperaturas NI 9211

Os dados recolhidos foram analisados com o *software LabView 2010*, onde foi programado um diagrama $T(t)$ que indica a evolução da temperatura em cada instante. Este programa possibilita a leitura de, no máximo, oito termopares.

Este *software* permite ainda criar um output de 0 a 5V, recorrendo a um módulo da *National Instruments* (NI 9263). Esta funcionalidade tem como objectivo criar um *Bypass* ao controlador, permitindo controlar directamente o tiristor. *O front panel* deste software é mostrado na figura 48.

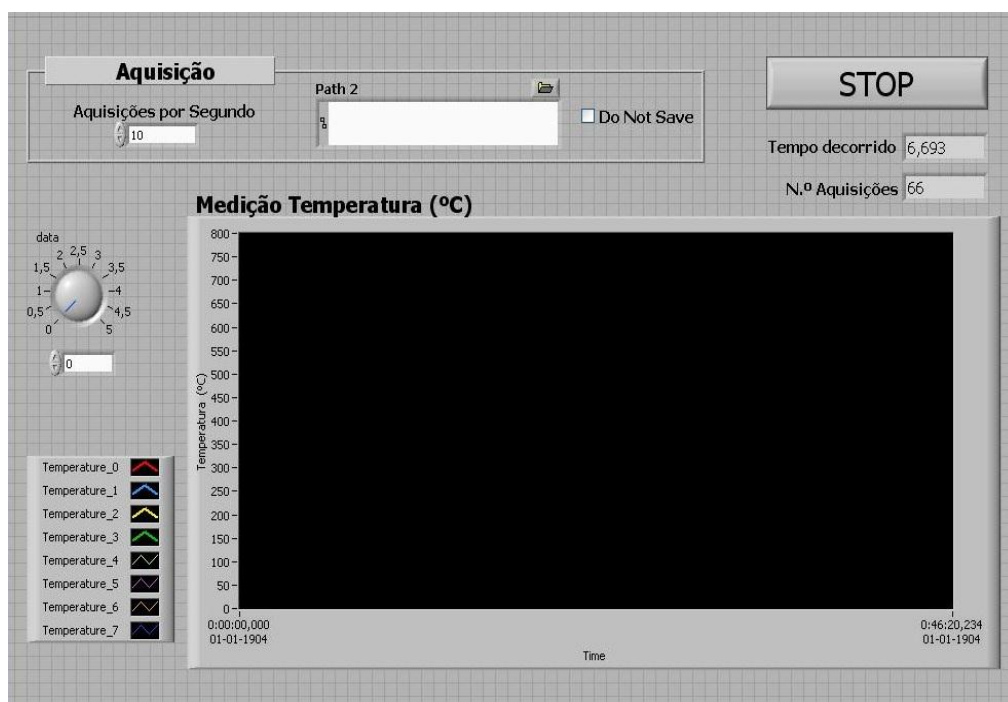


Figura 48 - Front Panel do software feito em LabView 2010

3.5 - Síntese do capítulo

Neste capítulo descreveu-se detalhadamente todo o projecto e construção de ambos os fornos. O projecto integral tanto para o forno de tratamentos térmicos como para o forno de fundição foi dividido em 4 grupos, distintos:

- Construção mecânica
- Verificação do isolamento térmico
- Instalação do sistema de controlo e potência
- Instrumentação

Foi construída para ambos os fornos uma carcaça metálica de protecção de modo a proteger o frágil isolamento térmico da câmara dos fornos.

Foi também desenvolvido um sistema hidropneumático de posicionamento do cadinho para o forno de fundição, já para o forno de tratamentos térmicos o sistema de posicionamento das amostras é providenciado por meio de um tabuleiro. Assim, houve que projectar e construir uma estrutura interna onde o tabuleiro assentasse.

Como ambos os fornos já estavam isolados termicamente, verificou-se analiticamente se o isolamento se encontrava correctamente dimensionado, calculando assim qual a temperatura exterior das paredes de isolante em regime permanente, assim como a potência térmica dissipada.

Posteriormente instalou-se o sistema de controlo e de potência dos fornos. De modo a caracterizar ambos os fornos, houve que desenvolver um programa de aquisição de dados, feitos em Labview.

Capítulo 4 - Resultados

Neste capítulo descreve-se o trabalho conducente à caracterização dos fornos, em particular do forno de tratamentos térmicos, mais exigente em termos de controlo que o forno de fundição. A caracterização dos fornos dividiu-se em quatro etapas:

- Determinação da gama de velocidades de aquecimento e arrefecimento possíveis de atingir neste equipamento.
- Verificação do sistema de controlo de ambos os fornos.
- Caracterização do perfil térmico no interior de ambos os fornos e determinação da zona útil de tratamentos térmicos.
- Verificação do isolamento térmico.

4.1 – Caracterização do funcionamento do forno de tratamentos térmicos

Com o objectivo de determinar a gama de velocidades possíveis de atingir neste forno, foi necessário identificar a velocidade máxima de aquecimento. Atendendo ao facto de que o controlador tem um output no máximo de 5 V, fez-se um *bypass* ao controlador, impondo directamente ao tiristor uma diferença de potencial de 5 V (figura 49).

As velocidades de aquecimento foram registadas através de um termopar colocado no centro do forno. Na figura 50 apresenta-se a curva T(t) que representa a velocidade máxima de aquecimento do forno e a sua evolução no tempo.



Figura 49 - Imposição de um input de 5V ao tiristor

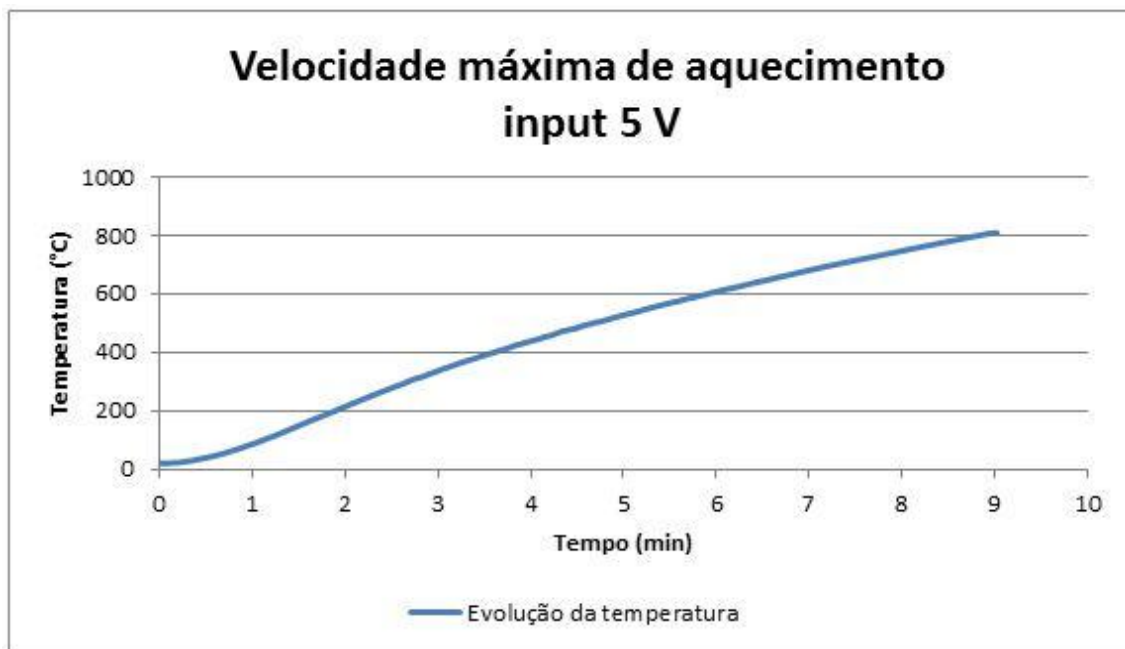


Figura 50 - Curva máxima de aquecimento – input 5V

Da figura 50, pode-se concluir que ao impor um *input* directamente ao tiristor, não se obtém uma rampa de aquecimento linear, podendo se identificar três comportamentos distintos na evolução da temperatura. Verifica-se uma evolução parabólica até cerca de 100 °C, seguida de uma evolução aproximadamente linear entre 100 e 300 °C. A partir sensivelmente dos 300 °C nota-se uma diminuição gradual do declive da rampa de aquecimento, devido ao facto de as perdas do forno aumentarem consideravelmente. Analisando a evolução global da temperatura entre T_{amb} (20 °C) e $T_{máx}$ (800 °C) determinou-se uma taxa média de aquecimento de $89^{\circ}C/min$.

Conhecendo a velocidade máxima de aquecimento do forno, pôde-se então verificar se o output do controlador estaria de acordo com o esperado. Para isso programou-se uma taxa de aquecimento de valor superior ao máximo determinado anteriormente e recorrendo a um multímetro verificou-se um output do controlador na ordem dos 5 V, tal como previsto.

De forma semelhante programou-se uma taxa de aquecimento bastante reduzida na ordem de $0,5^{\circ}C/min$ com o objectivo de verificar o output mínimo do controlador. Ao contrario do que seria de esperar, obteve-se uma velocidade mínima de aquecimento de $8^{\circ}C/min$ (figura 51). Recorrendo a um multímetro verificou-se que o output mínimo do controlador é de 0,8 V o que impossibilita o controlador de impor velocidades de aquecimento reduzidas. Isto deve-se ao facto de o controlador adquirido originalmente ter um output de 4 a 20 mA. De modo a que o output seja concordante com o input do tiristor (0 a 5 V), alterou-se a resposta do controlador, introduzindo uma resistência de 250 Ω , ficando assim teoricamente com um sinal de saída de 1 a 5 V, embora na realidade este sinal seja de 0,8 a 5 V.

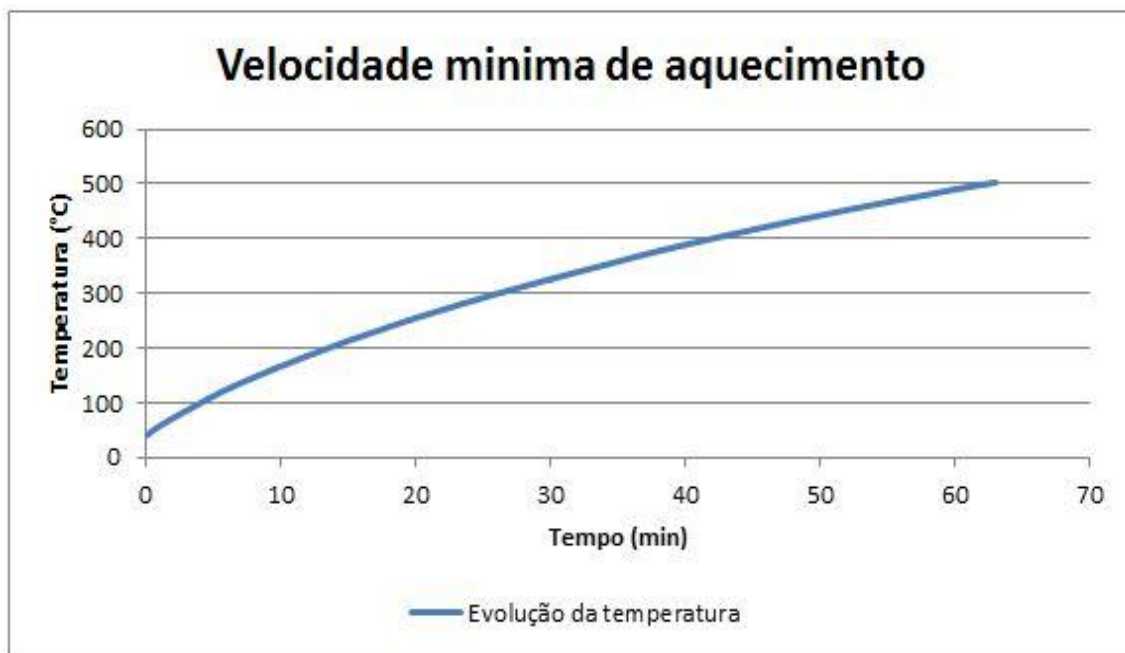


Figura 51 – Evolução da temperatura á velocidade mínima de aquecimento

Para analisar as taxas de aquecimento possíveis de obter no forno de tratamentos térmicos, determinaram-se diferentes curvas de aquecimento em função de vários inputs, impostos directamente ao tiristor, como se pode observar na figura 52.

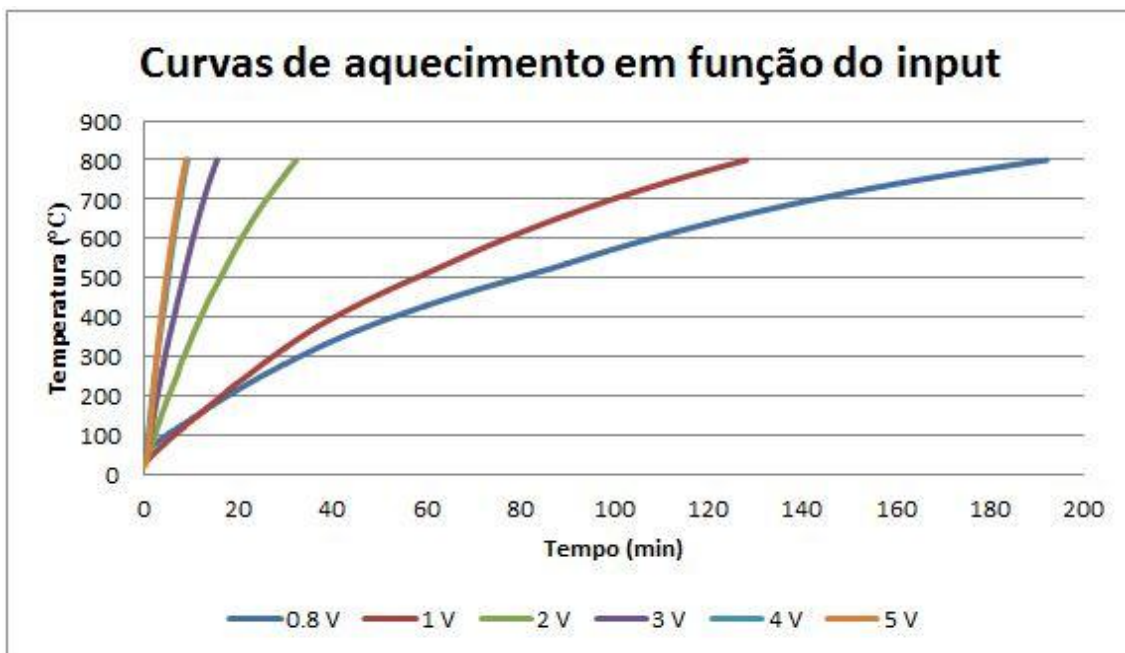


Figura 52 - Curvas de aquecimento em função do input

Na figura 52, verifica-se um aumento substancial da taxa de aquecimento a partir de um input de 2V, observando-se também uma diminuição gradual do declive das curvas em função do aumento da temperatura, devido ao aumento das perdas do forno.

As velocidades médias de aquecimento, determinadas experimentalmente, para diferentes intervalos de temperatura, estão resumidas na tabela 5.

Tabela 5 - Velocidades de aquecimento em função de vários inputs

Temperatura (°C)	Velocidades de aquecimento em função do input (°C/min)					
	0,8 V	1 V	2 V	3 V	4 V	5 V
T _{amb} a 100	8,7	10,8	30,4	52,1	76,9	71,8
100 a 200	7,7	9,9	34,6	67,6	110,0	128,6
200 a 300	6,5	9,2	31,1	59,5	100,6	128,0
300 a 400	5,0	7,6	27,8	52,8	92,0	107,9
400 a 500	3,8	5,8	24,0	51,2	82,6	94,4
500 a 600	3,5	5,2	22,3	48,5	77,3	81,2
600 a 700	2,9	4,4	18,6	43,2	71,8	72,5
700 a 800	2,0	3,5	15,7	35,7	63,0	64,3

Da tabela 5, pode-se verificar, como tinha sido referido anteriormente, uma gradual diminuição da velocidade de aquecimento com o aumento da temperatura. Observa-se também para inputs superiores a 1 V, um aumento da taxa de aquecimento do intervalo de 20 a 100 °C relativamente ao intervalo de 100°C a 200°C. Isto deve-se ao facto do forno se encontrar frio, existindo alguma inércia no arranque do mesmo.

Da análise da tabela 5, pode-se determinar a gama de velocidades possível de ser imposta pelo controlador, como se pode observar na tabela 6. Esta gama de velocidades é válida para qualquer tratamento térmico, embora seja possível atingir velocidades superiores á velocidade máxima indicada na tabela 6, para temperaturas inferiores a 800 °C.

Tabela 6- Gama de velocidades de aquecimento do forno de tratamentos térmicos

Velocidade mínima de aquecimento (°C/min)	Velocidade máxima de aquecimento (°C/min)
8,7	64,3

Para a caracterização deste forno interessa ainda saber as taxas de arrefecimento possíveis de obter. Na figura 53, está representada a curva de arrefecimento do forno, observando-se um arrefecimento de 800 até 60°C em 16,4 horas. Na tabela 7 verificam-se as diferentes velocidades de arrefecimento, correspondentes a diferentes intervalos de temperatura.



Figura 53 – Evolução da temperatura no arrefecimento do forno

Tabela 7 – Velocidades médias de arrefecimento

Intervalo de Temperatura (°C)	Velocidade média de arrefecimento (°C/min)
800 a 700	6,3
700 a 600	4,1
600 a 500	2,2
500 a 400	1,4
400 a 300	1,0
300 a 200	0,6
200 a 100	0,3
100 a 60	0,2

Da tabela 7 constata-se, como seria de esperar, uma diminuição gradual da velocidade de arrefecimento à medida que a temperatura no interior do forno baixa. Observa-se também um aumento significativo das perdas do forno a partir sensivelmente dos 500 °C.

Com o objectivo de analisar o sistema de controlo do forno de tratamentos térmicos, assim como de caracterizar o perfil térmico no interior do forno, simularam-se alguns tratamentos térmicos de modo a validar a sua concretização. Na tabela 8, indicam-se os parâmetros testados.

Tabela 8 – Parâmetros dos tratamentos térmicos ensaiados

Tratamento térmico	Velocidade de aquecimento ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	Temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$)	Tempo de patamar à temperatura máxima (min)
Envelhecimento de alumínio	10	250	10
	10	450	10
Recozimentos de aços	10	600	10
	10	800	10
	20	600	10
	20	800	10

De modo a caracterizar o perfil térmico no interior do mesmo, foram colocados cinco termopares, todos eles sensivelmente a meio do forno e no plano do tabuleiro de suporte das amostras. Na figura 54 encontra-se esquematizado o posicionamento dos cinco termopares.

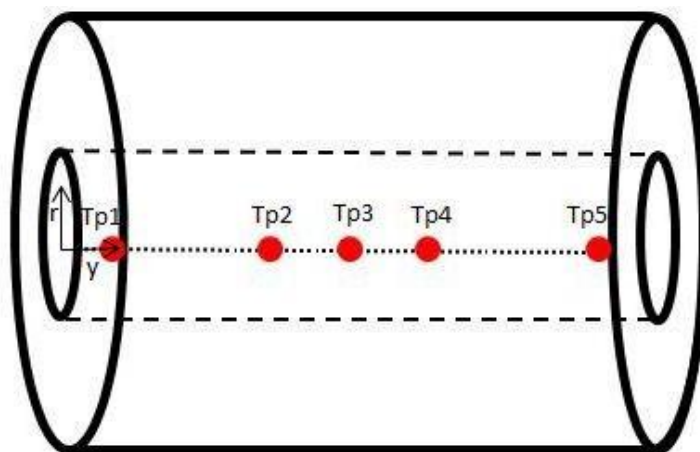


Figura 54 – Esquema do posicionamento dos termopares

Os termopares Tp1 e Tp5 foram colocados a 5 cm da porta e da tampa posterior, respectivamente. O termopar Tp3 foi colocado sensivelmente a meio do forno, $y = 26,5$ cm, distando 10 cm dos termopares Tp4 e Tp2. Assim, pretendeu-se avaliar o desempenho numa área útil do forno, de 20 cm de comprimento, no centro do forno. Com o objectivo de facilitar a colocação dos termopares 2, 3 e 4 foram utilizados termopares diferentes dos referidos anteriormente. Assim nos seguintes ensaios os valores referentes aos termopares 1 e 5 foram registados por termopares tipo K de 0,5 mm de diâmetro enquanto que os valores relativos aos termopares 2, 3 e 4 foram registados por termopares também do tipo K de 0,3mm de diâmetro.

Ao simular o tratamento térmico de envelhecimento de alumínio a 250°C (figura 55) pode-se observar que o sistema de controlo do forno, reproduziu de forma bastante satisfatória a taxa de aquecimento pretendida, verificando-se um erro relativo de 2%.

Ainda no que diz respeito ao sistema de controlo, pode-se observar um controlo deficiente do patamar isotérmico pretendido a 250 °C, verificando-se um aumento de temperatura de 61 °C, o que corresponde a um erro relativo de 24,4%.

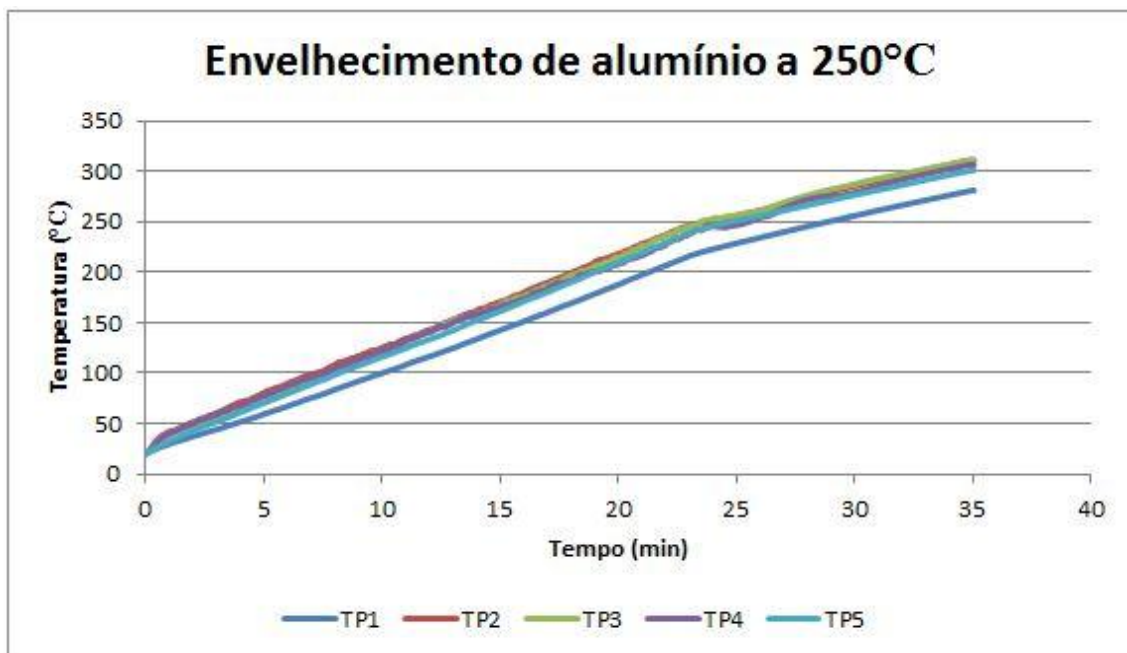


Figura 55 – Tratamento de envelhecimento de alumínio a 250°C

De forma a analisar o perfil térmico no interior do forno, traçou-se uma curva T(d), num instante de tempo, a meio do patamar isotérmico, como se mostra na figura 56.

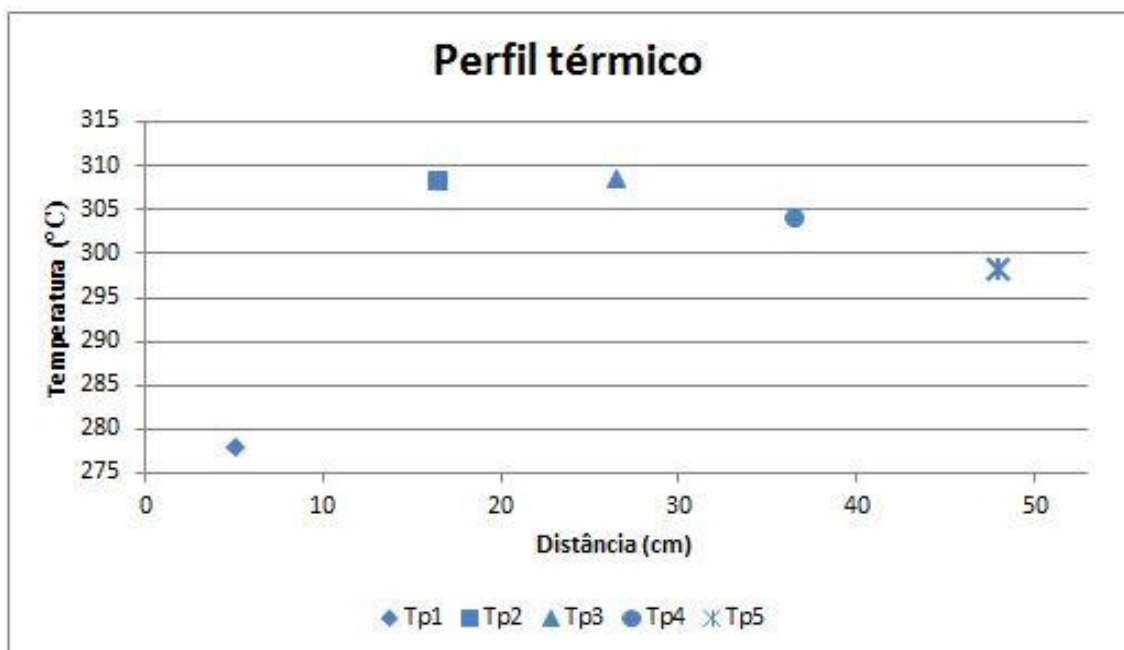


Figura 56 – Perfil térmico no instante t=30 min

Identificam-se duas zonas frias, perto das extremidades do forno, enquanto que no centro se regista a temperatura mais elevada, sendo que o termopar colocado a 16,5 cm da porta regista uma temperatura bastante semelhante à registada por Tp3. Já o termopar Tp4 regista uma temperatura 4,5 °C menor que Tp2 e Tp3.

De modo a observar o comportamento térmico no centro do forno, ao longo de todo o ensaio, analisaram-se os dados relativos aos termopares 2, 3 e 4 (figura 57).

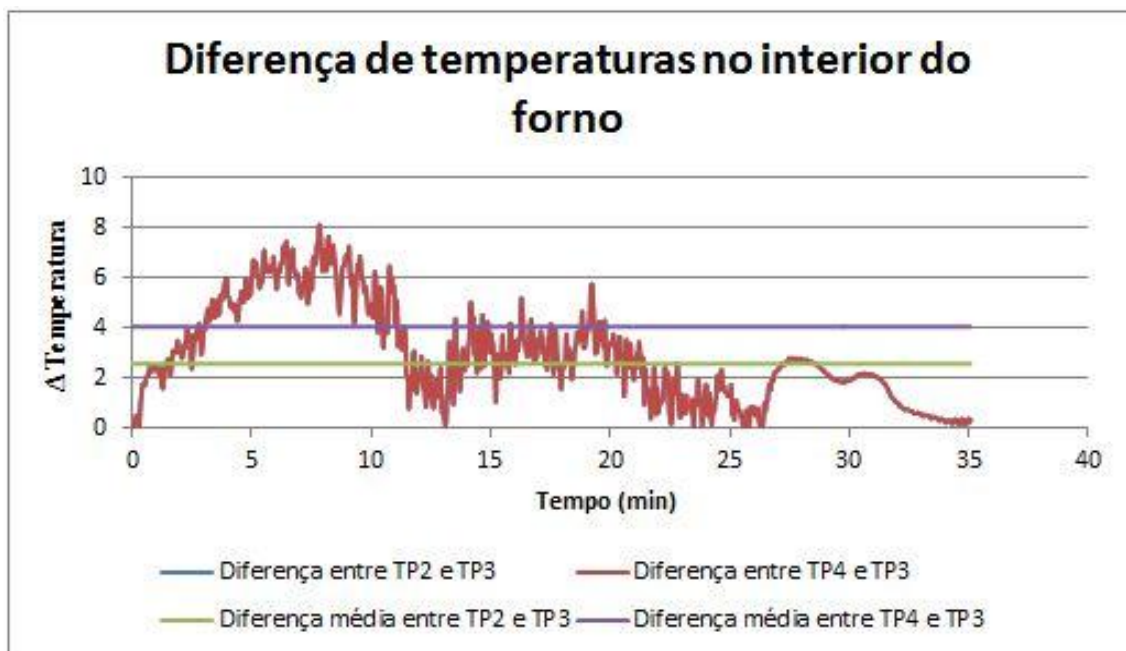


Figura 57 – Diferença de temperaturas no tratamento de envelhecimento de alumínio a 250°C

Observam-se grandes oscilações na temperatura registada pelos 3 termopares na fase de aquecimento, sendo bastante mais estável durante o patamar isotérmico, entre o instante $t=25$ min e $t=35$ min. Observa-se também que a diferença média de temperaturas lidas entre Tp2 e Tp3 é de 2,5 °C, enquanto que a diferença média registada entre Tp3 e Tp4 é de 4,1 °C. Concluindo-se que na região entre $y=16,5$ cm e $y=26,5$ cm a temperatura é mais uniforme do que entre $y=26,5$ cm e $y=36,5$ cm.

Na figura 58 está representada a curva $T(t)$, simulando um tratamento de envelhecimento de um alumínio a 450 °C. De forma semelhante ao ensaio anterior, pode-se observar um bom controlo da velocidade de aquecimento imposta, 10 °C/min, embora o controlo sobre o patamar isotérmico seja insuficiente, verificando-se um aumento de 26 °C durante os 10 min de patamar, o que constitui um erro relativo de 5,77%.

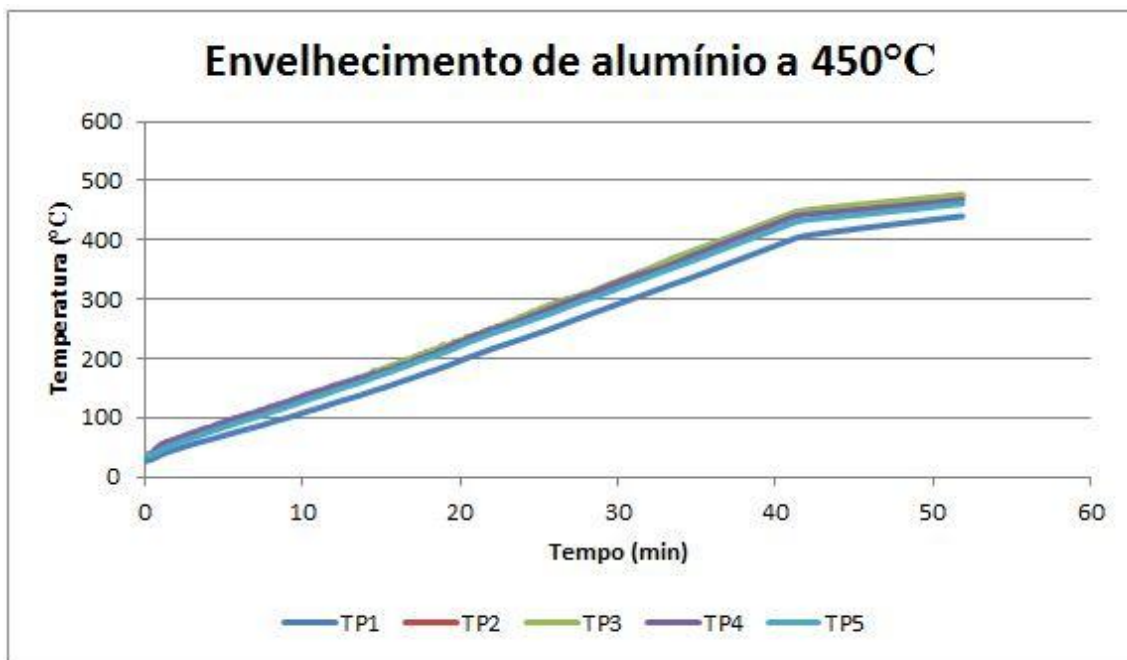


Figura 58 – Envelhecimento de alumínio a 450°C

Analisando o perfil térmico no interior do forno (figura 59), o comportamento térmico do forno é semelhante ao do ensaio anterior embora se verifique um aumento da diferença entre Tp3 e Tp4. Observa-se uma diferença em cerca de 2 °C entre Tp2 e Tp3 enquanto que entre os termopares 3 e 4 regista-se uma diferença de 11 °C, superior à diferença registada entre estes termopares no ensaio anterior.

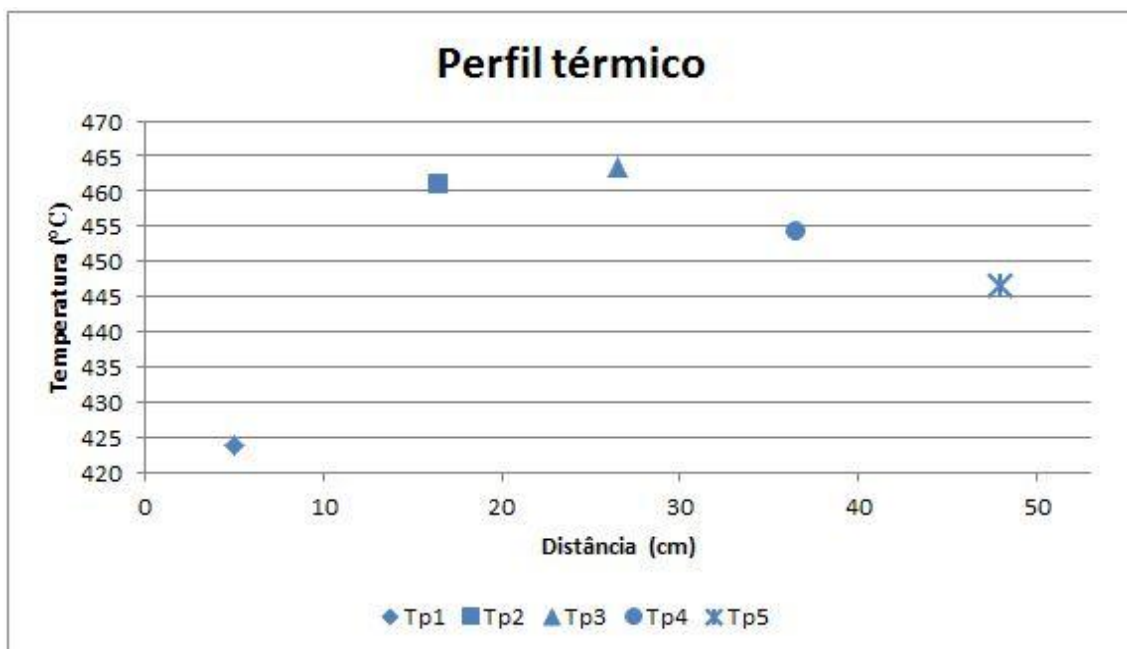


Figura 59-Perfil térmico no instante t=47 min

Na figura 60, pode-se observar que a diferença média de temperaturas entre Tp2 e Tp3 manteve-se praticamente constante (2,6 °C), em relação ao ensaio de envelhecimento de alumínio até aos 250°C, enquanto que a diferença média entre Tp3 e Tp4 aumentou, situando-se agora nos 5,3°C.

Identifica-se também um aumento considerável da diferença entre TP3 e Tp4 durante o patamar isotérmico, sendo essa diferença média de 9 °C, bastante superior à diferença média registada entre os termopares 2 e 3 de 2,3°C.

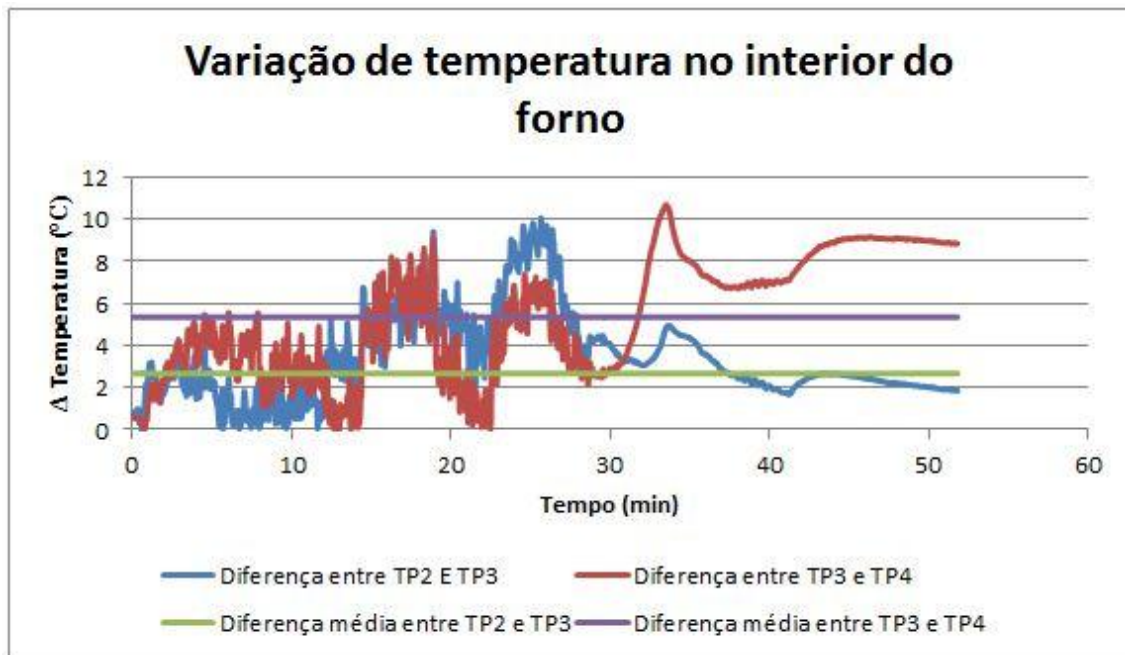


Figura 60 – Variação de temperatura durante tratamento de envelhecimento de alumínio a 450°C

Na figura 61 representa-se a curva T (t) referente ao recozimento subcrítico a 600 °C. À semelhança de todos os outros ensaios constata-se um bom controlo sobre a velocidade programada no controlador. Verifica-se também, neste ensaio, um aumento considerável no controlo sobre o patamar isotérmico, havendo um aumento de 14 °C durante os 10 min de patamar, o que constitui um erro relativo de 2,3%.

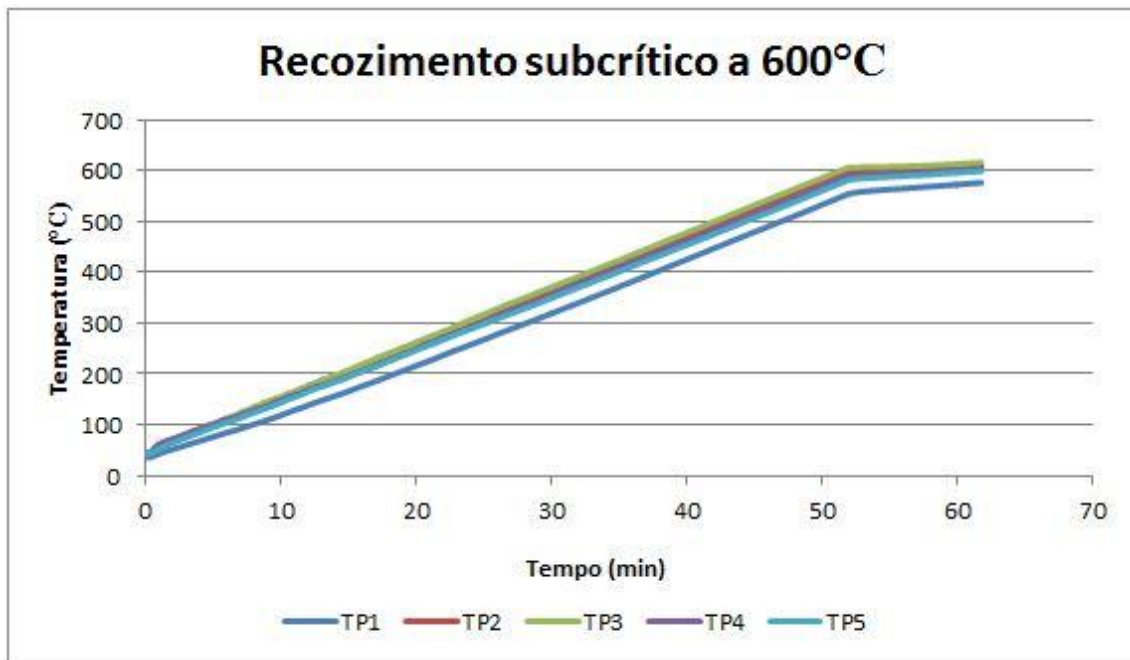


Figura 61 – Recozimento subcrítico

Da figura 62 pode-se observar a concordância com os outros ensaios realizados. Notando-se a tendência para que Tp1 seja claramente o termopar que registra a menor temperatura. Verifica-se também a tendência para que a temperatura registrada por Tp2 seja sempre mais próxima de Tp3 que a temperatura registrada por Tp4.

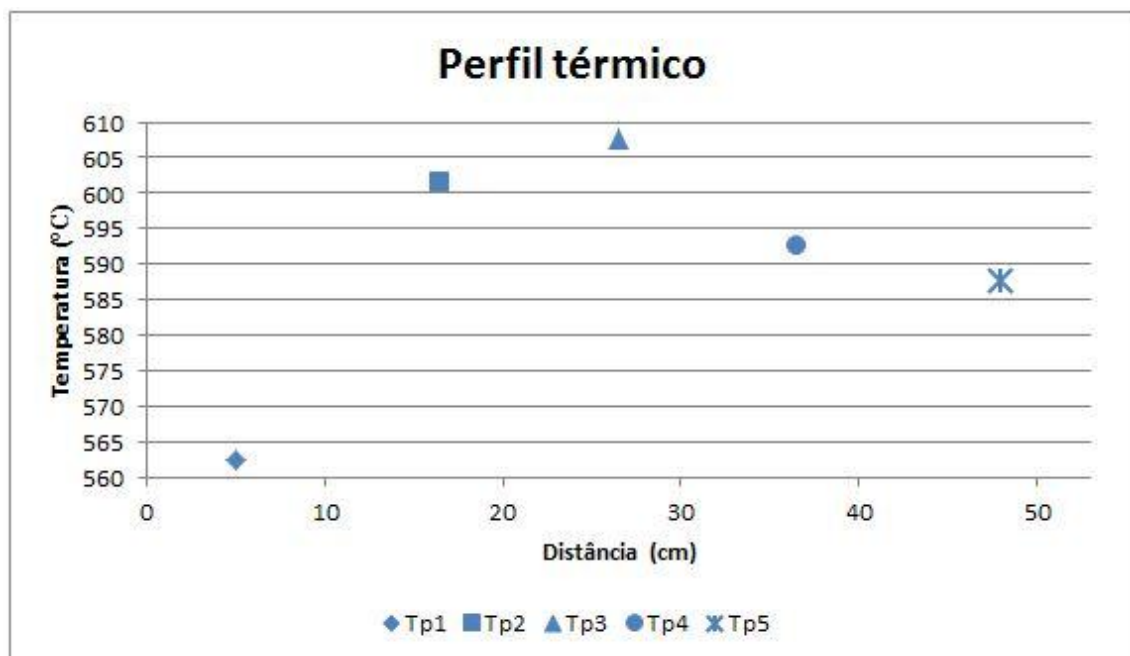


Figura 62 – Perfil térmico no instante t=57 min

Na figura 63, pode-se observar a evolução das diferenças de temperaturas entre as leituras dos termopares 2,3 e 4, verificando-se um aumento dessas mesmas diferenças em relação a ensaios anteriores. Observando-se uma diferença média entre os termopares 2 e 3 de 7 °C, enquanto que entre os termopares 3 e 4, verifica-se uma diferença média de 13,9 °C.

Pode-se também observar que durante o patamar isotérmico, situado entre os instantes $t = 52$ min e $t = 62$ min a diferença média entre Tp2 e Tp3 decresce para 5,3 °C, já a diferença média entre Tp3 e Tp4 situa-se próximo dos 14 °C.

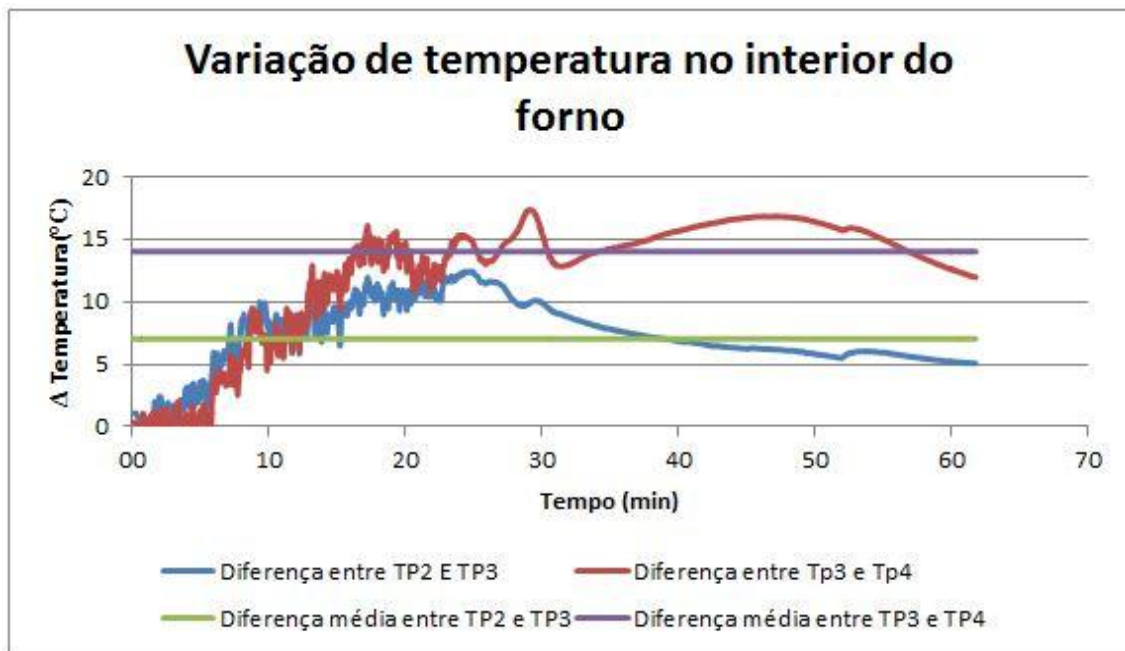


Figura 63 – Variação da temperatura durante recozimento subcrítico a 600°C

Na figura 64, pode-se observar o ensaio referente ao ensaio de recozimento de aço a 800 °C. Confirmando-se um bom controlo sobre a velocidade de aquecimento, assim como sobre o patamar isotérmico, verificando-se ao fim de 10 minutos de patamar um aumento de temperatura de 0,5 °C o que representa um erro relativo de 0,06%.

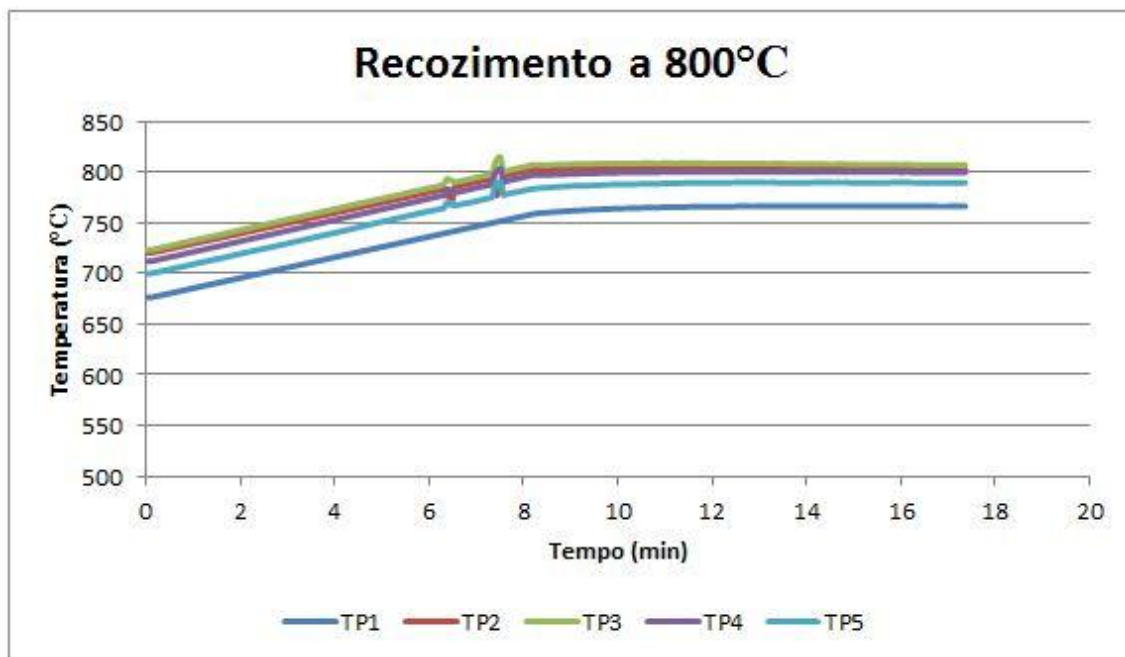


Figura 64 – Recozimento a 800°C

Da análise da figura 65, verifica-se mais uma vez a proximidade entre as temperaturas registadas entre TP2 e TP3, sendo a diferença entre estes de 4°C. Nota-se também que a diferença entre TP3 e TP4 é significativamente maior, situando-se nos 10°C.

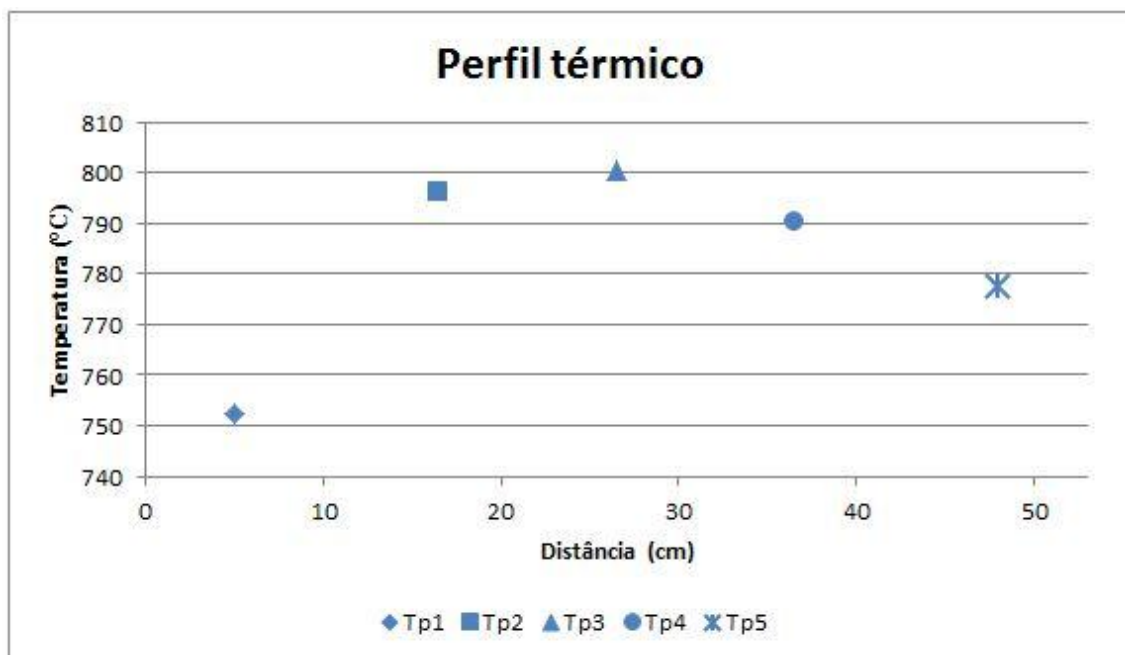


Figura 65 – Perfil térmico no instante t=13 min

Analisando as diferenças registadas entre os termopares 2, 3 e 4 ao longo de todo o ensaio (figura 66), pode-se observar, à semelhança dos outros ensaios realizados, uma diferença de temperaturas registadas, durante todo o ensaio, pelos termopares 2 e 3 muito inferior à diferença de temperaturas lidas pelos termopares 3 e 4. Sendo a diferença média entre os valores lidos por Tp2 e Tp3 de 4,5 °C enquanto que a diferença média entre Tp3 e Tp4 se situa nos 9,7 °C.

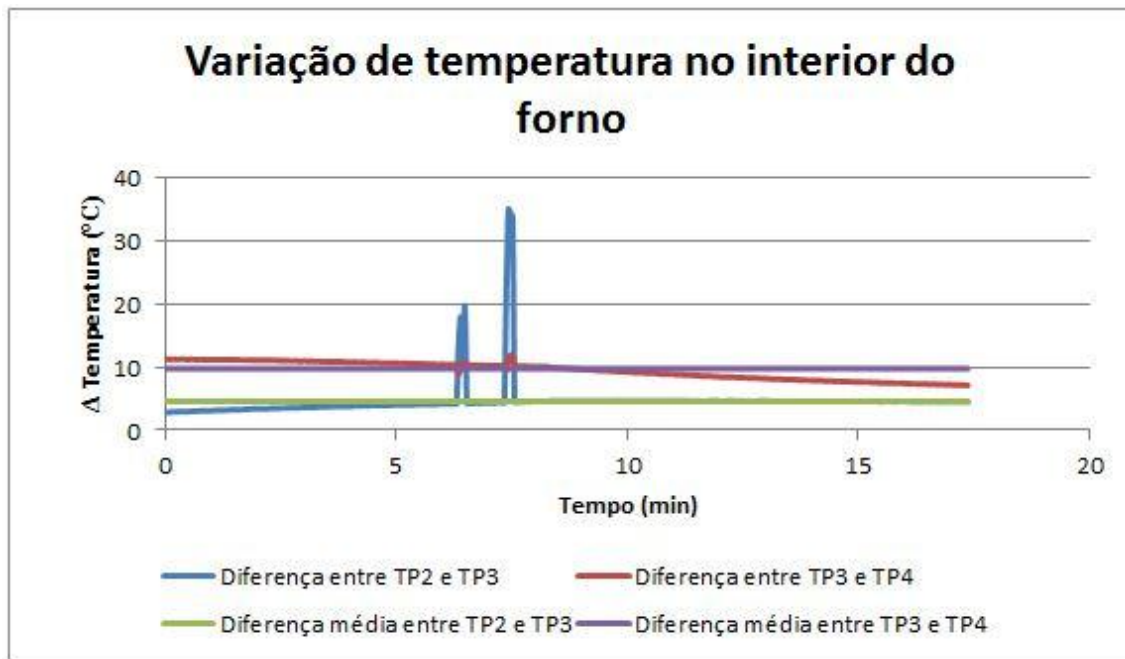


Figura 66- Variação de temperatura durante recozimento a 800°C

Por fim, simularam-se os tratamentos térmicos de recozimento com uma taxa de aquecimento de 20 °C/min e com patamares isotérmicos a 600 e 800 °C. Com o objectivo de minimizar o tempo, ambos os ensaios foram realizados num só. Da figura 67, verifica-se um bom controlo sobre a taxa de aquecimento programada verificando-se um erro relativo de 0,4%.

Observa-se também um excelente controlo sobre ambos os patamares isotérmicos, verificando-se um erro relativo na execução de ambos os patamares de 0.1%. Comparando com o ensaio de recozimento subcrítico a uma velocidade de aquecimento de 10 °C/min verifica-se que o erro relativo na execução do patamar a 600 °C é 2,1 % menor, mantendo-se praticamente igual na execução do patamar a 800°C.

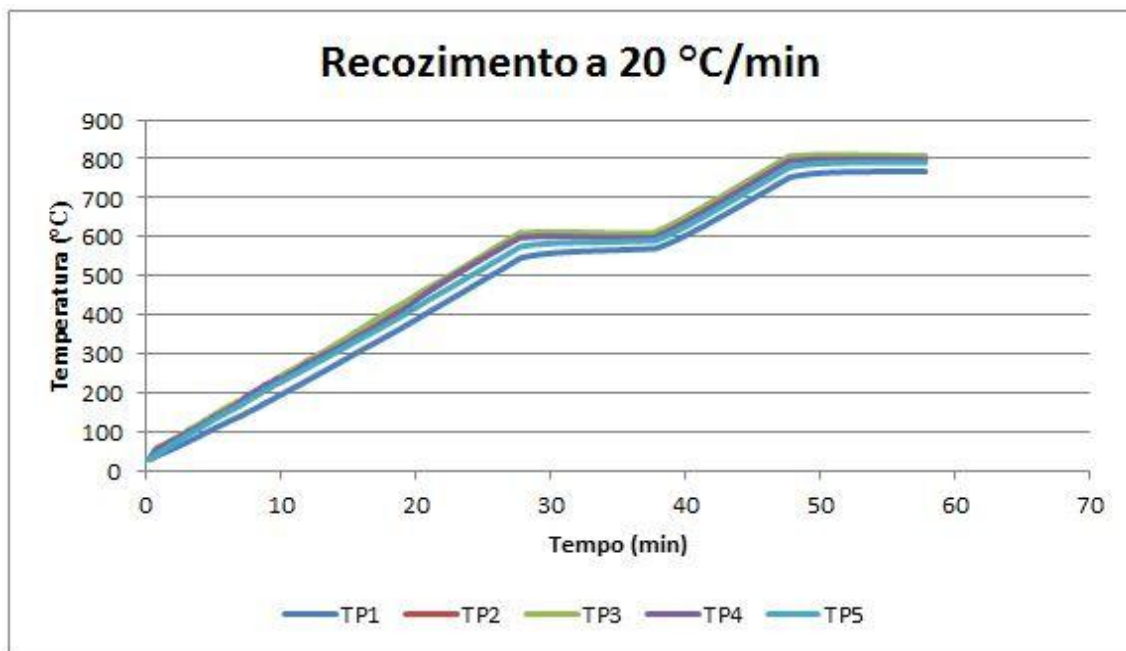


Figura 67 – Recozimento subcrítico a uma taxa de aquecimento de 20°C/min

Analisando o perfil térmico durante o patamar a 600 °C, identificam-se mais uma vez duas zonas frias, perto das extremidades do forno. Verifica-se também uma diferença de 4,5 °C entre as temperaturas registadas por Tp2 e Tp3, bastante menor que a diferença registada pelos termopares 3 e 4, situando-se nos 11,5 °C (figura 68).

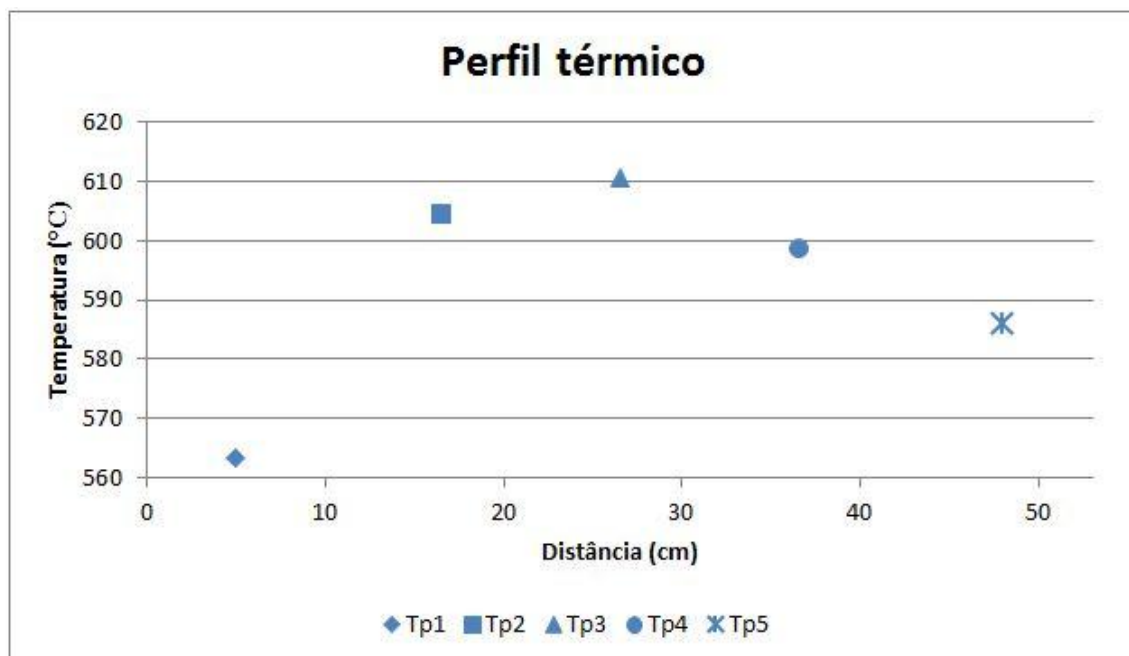


Figura 68 – Perfil térmico no instante t=33 min

Analisando agora o perfil térmico durante o patamar a 800 °C, representado na figura 69, verifica-se uma maior proximidade entre Tp2 e Tp3, comparando-o com o patamar a 600 °C, sendo essa diferença agora de 3,4 °C. A diferença entre as temperaturas registadas por Tp4 e Tp3 mantém-se praticamente constante.

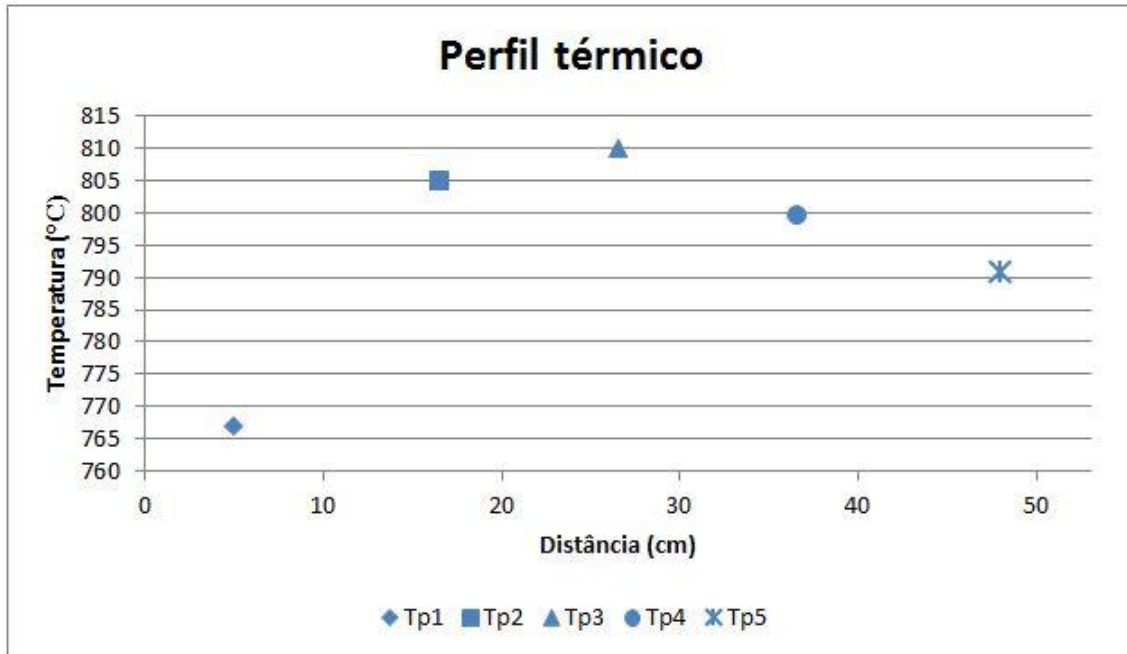


Figura 69 – Perfil térmico no instante t=53 min

Na figura 70, observa-se que a diferença média entre Tp2 e Tp3, durante todo o ensaio, se situa nos 5,7 °C, já entre os termopares 3 e 4 é o dobro, 11,4 °C.

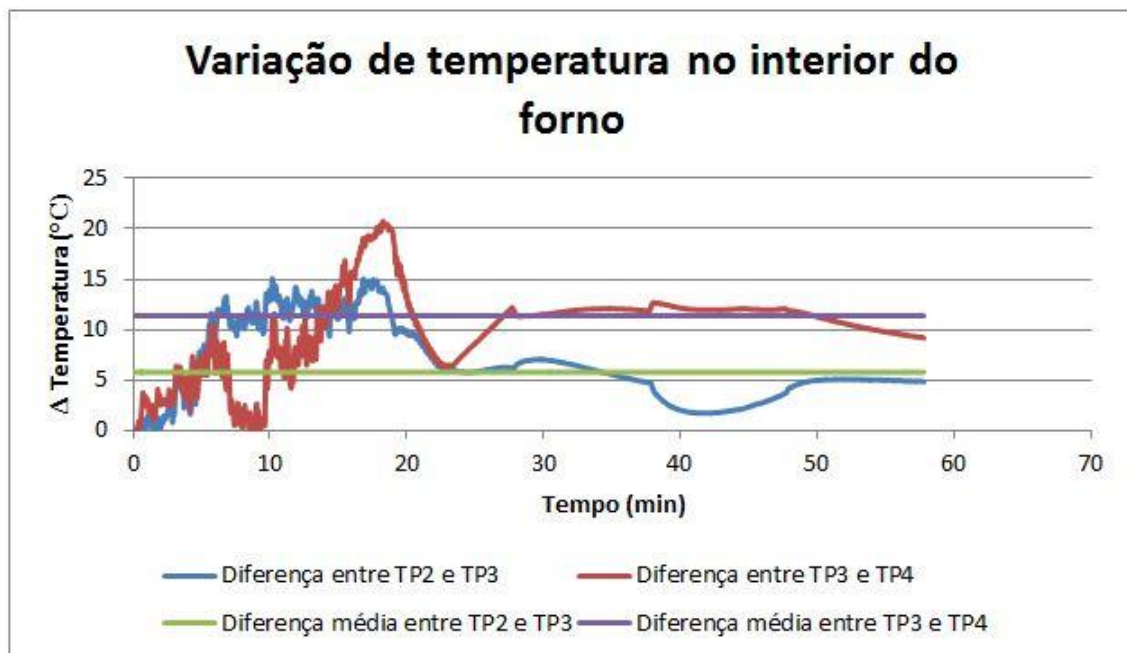


Figura 70 – Variação da temperatura durante recozimento subcrítico com uma taxa de aquecimento de 20°C/min

Analisando apenas a diferença média registrada pelos três termopares durante os dois patamares verifica-se para o patamar isotérmico de 600 °C uma diferença média entre Tp2 e Tp3 de 6,1°C, já entre Tp3 e Tp4 observa-se uma diferença média perto de 12 °C.

Analisando o patamar a 800 °C observa-se uma diminuição de ambas as diferenças médias, sendo que entre Tp2 e Tp3 regista-se uma diferença de 5 °C enquanto que entre Tp3 e Tp4 verifica-se uma diferença de 10,3 °C.

Na tabela 9 está representada a zona útil do forno para cada tratamento térmico, assim como, as diferenças médias de temperaturas registradas pelos termopares 2, 3 e 4.

Tabela 9 - Zona útil do forno para cada um dos tratamentos térmicos testados

	Velocidade de aquecimento (°C/min)	Diferença média entre Tp2 e Tp3	Diferença média entre Tp3 e Tp4	Zona útil do forno (cm)
Envelhecimento a 250°C	10	2,57	4,1	16,5 a 36,5
Envelhecimento a 450°C	10	2,67	5,3	16,5 a 36,5
Recozimento a 600°C	10	7	13,9	16,5 a 26,5
Recozimento a 800°C	10	4,5	9,7	16,5 a 26,5
Recozimento a 600°C	20	6,2	12	16,5 a 26,5
Recozimento a 800°C	20	5	10,3	16,5 a 26,5

Com o objectivo de avaliar o perfil térmico transversal ao plano do tabuleiro, colocaram-se três termopares a meio do forno, dois em ambas as extremidades do tabuleiro e outro a meio, como se pode observar na figura 71, elevando-se a temperatura do forno até 800 °C tendo sido mantido a essa temperatura durante aproximadamente 20 minutos (figura 72).

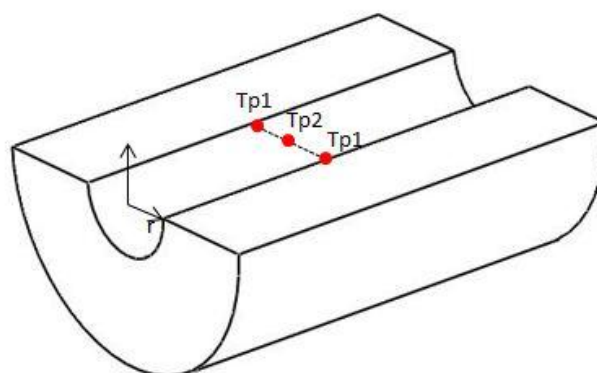


Figura 71 - Esquema de posicionamento dos termopares

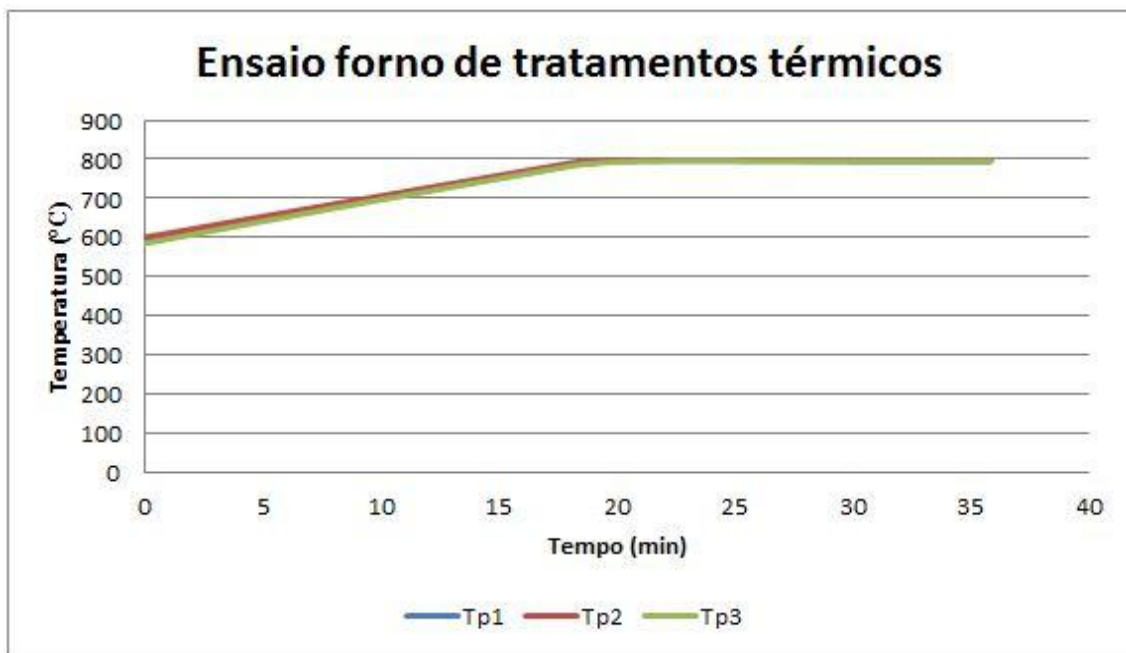


Figura 72 - Ensaio com o objectivo de analisar o perfil térmico transversal

Na figura 72, pode-se observar, uma sobreposição das curvas relativas às leituras dos três termopares, sobretudo durante o patamar isotérmico. De modo a avaliar o perfil térmico com maior exactidão, analisou-se um ponto a meio do patamar isotérmico, $t=28$ min, traçando uma curva $T(d)$, (figura 73). Pode-se constatar que a temperatura é mais elevada em $r=0$ cm. Verificando-se uma diferença entre Tp1 e Tp2 sensivelmente de 1°C , enquanto que a diferença entre os termopares 2 e 3 é de aproximadamente 2°C .

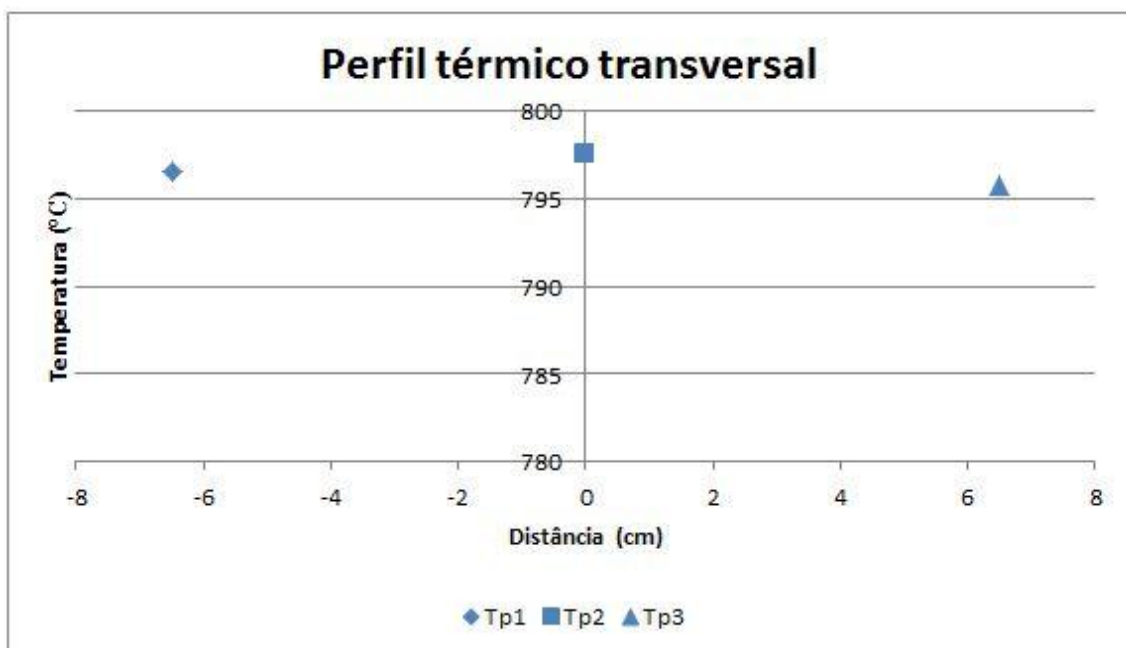


Figura 73- Perfil térmico transversal

Em alguns tratamentos térmicos, interessa que o arrefecimento seja lento, para isso muitas vezes, as amostras a tratar são deixadas a arrefecer dentro do forno. Assim analisou-se o comportamento térmico do forno, durante o arrefecimento. O ensaio realizado foi feito com a porta do forno fechada.

Da figura 74, como era espectável, observa-se uma diminuição da temperatura junto das extremidades do forno muito mais acentuada que no seu interior. Verificando-se uma sobreposição das curvas de arrefecimento correspondentes aos termopares 2,3 e 4, o que nos indica uma reduzida diferença de temperaturas entre eles. Como se pode observar pela figura 75, verificando-se uma grande aproximação entre as três temperaturas a partir da primeira hora de arrefecimento, sendo que a diferença entre Tp2 e Tp3 se situa nos 1,8 °C enquanto que a diferença entre Tp3 e Tp4 se situa nos 3,4 °C.

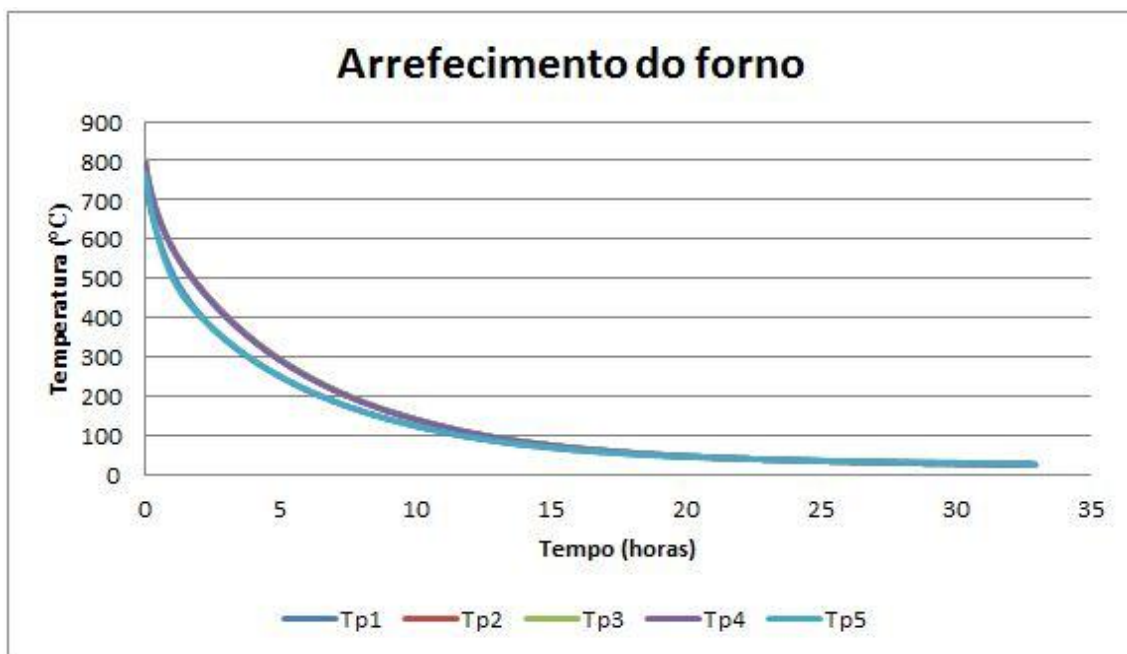


Figura 74- Curva de arrefecimento do forno

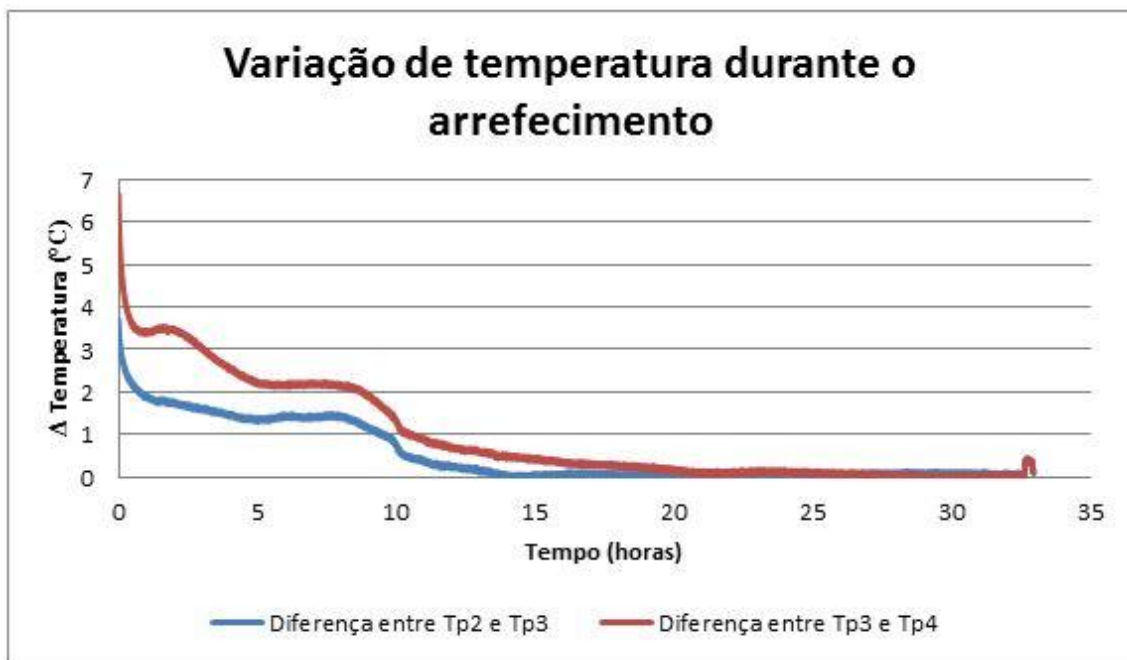


Figura 75- Variação da temperatura no interior do forno durante o arrefecimento do forno

Com o objectivo de testar o isolamento do forno, aqueceu-se o forno até à temperatura máxima de funcionamento, 800°C , mantendo-o a essa temperatura durante 4 horas, por forma a vencer a inércia térmica das paredes de isolante do forno, e assim verificar qual a temperatura atingida nas faces exteriores do isolante.

Na figura 76, pode-se observar que a tampa de isolante posterior, atinge uma temperatura de 110°C , atingindo essa temperatura aproximadamente em uma hora. A porta e a câmara do forno, por terem uma espessura de isolante superior apresentam, não só, temperaturas menores, mas também, uma inercia térmica bastante superior, sendo que a temperatura da porta atinge os 59°C em cerca de 4 horas, enquanto que a temperatura exterior da câmara do forno atinge os 97°C , no mesmo espaço de tempo.

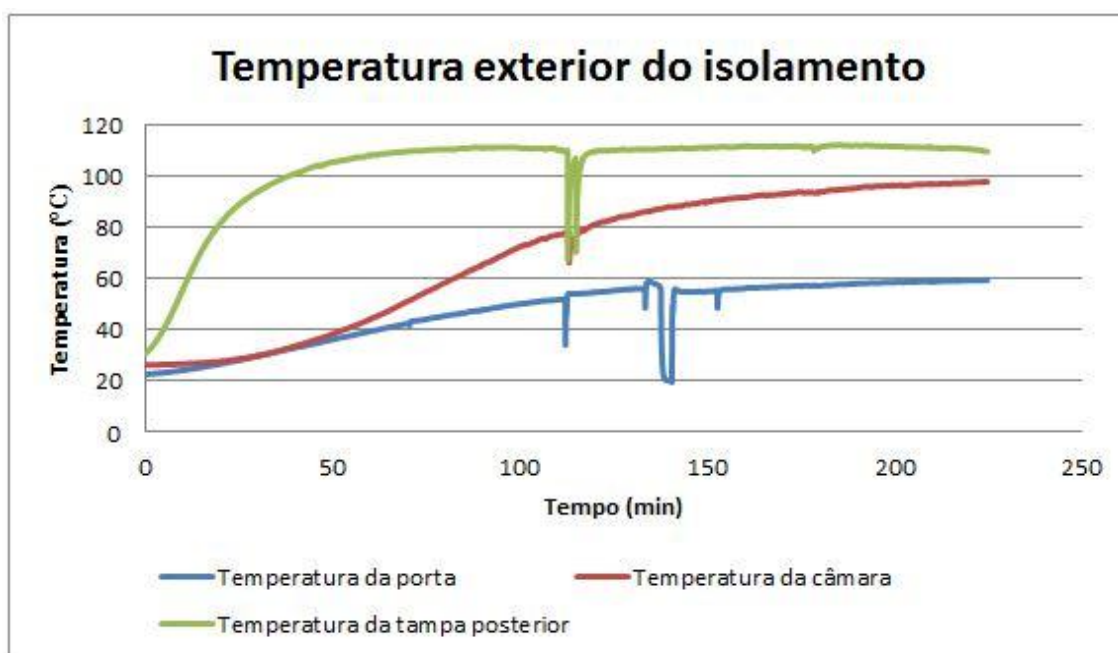


Figura 76 – Evolução da temperatura exterior do forno

Na tabela 9, estão representadas as temperaturas calculadas analiticamente e as temperaturas registadas pelos termopares. Observa-se um erro bastante elevado na temperatura estimada para a tampa posterior, sendo que o principal motivo desse erro derivou da temperatura ter sido registada no centro da tampa, bastante mais quente do que na periferia, tendo sido o cálculo da temperatura efectuado considerando que toda a face exterior da tampa de isolante estaria à mesma temperatura.

Tabela 10 – Temperaturas nas paredes exteriores do isolante no forno de tratamentos térmicos

	Temperatura estimada analiticamente	Temperatura medida	Erro relativo
	(°C)	(°C)	(%)
Porta	66,1	59	10,7
Câmara	93,2	97	3,9
Tampa posterior	76,7	110	30,2

Depois de realizados alguns ensaios caracterizou-se o funcionamento do forno de tratamentos térmicos. É de notar que devido ao sinal de output do controlador não ser de 0 a 5 V, não são possíveis realizar neste forno patamares isotérmicos inferiores a 600 °C, assim como taxas de aquecimento inferiores a 8,7 °C/min. Este facto tem graves implicações não só nos aspectos acima mencionados, mas também porque o forno, devido a este sinal de output do controlador, é incapaz de se desligar automaticamente.

Outro aspecto fundamental é a área útil do mesmo, sendo que na maioria dos tratamentos térmicos verifica-se uma área útil de 10 cm, entre as coordenadas $y=16,5$ e $y=26,5$ cm.

Na tabela 10 encontram-se os parâmetros de funcionamento do forno de tratamentos térmicos.

Tabela 11 – Parâmetros de funcionamento do forno de tratamentos térmicos

Sinal de saída do controlador (V)	Gama de velocidades admissível pelo controlador (°C/min)	Aplicabilidade de patamares isotérmicos (°C)	Zona útil do forno (cm)
0,8 a 5	8,7 a 64,3	Superior a 600	$y=16,5$ a $y=26,5$

Por forma a otimizar o forno de tratamentos térmicos desenvolveu-se um circuito eléctrico com o objectivo principal de transformar o valor mínimo de output do controlador, de 0,8V para 0 V. Esta transformação permite eliminar a dificuldade observada em obter patamares isotérmicos a temperaturas inferiores a 600 °C, podendo também atingir-se taxas de aquecimento inferiores a 8,7 °C/min.

Na figura 77 ilustra-se o circuito desenvolvido, em que $R1 = 30\text{ k}\Omega$ e $R2 = 20\text{ k}\Omega$. A tensão de referencia (U_{off}) tem o valor de 2,5 V e U_{in} representa o output vindo do controlador de 0,8 a 5 V.

Simulando o circuito no software de cálculo *simulink*, obtiveram-se os valores de U_{out} para os vários valores de U_{in} , mostrados na tabela 12. No anexo B1 apresentam-se as especificações do ampop utilizado na simulação.

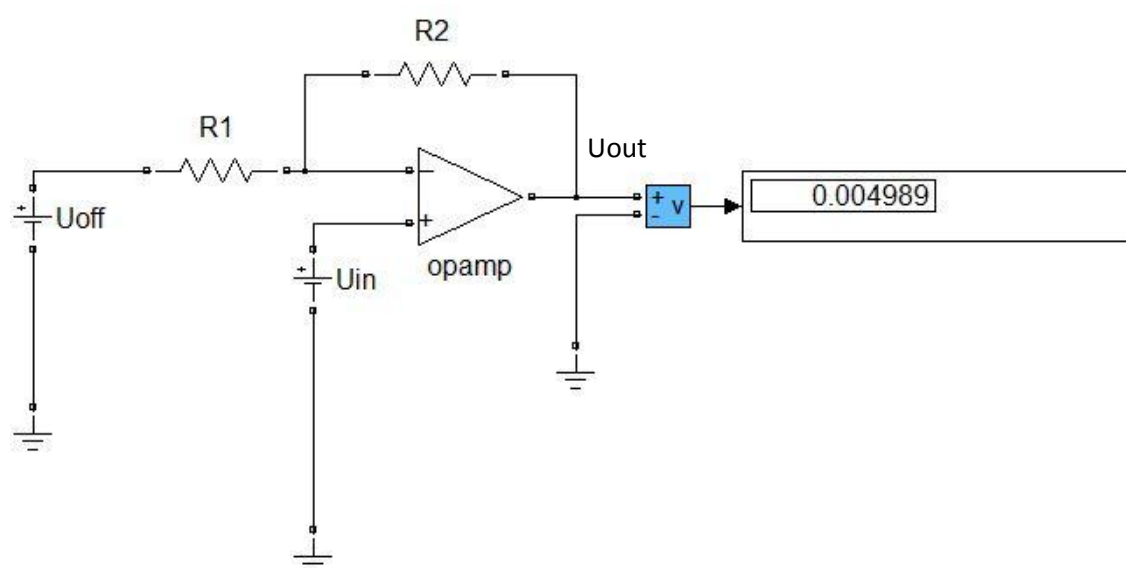


Figura 77 - Circuito de transformação do output do controlador

Tabela 12 – Tabela com os valores de U_{out} , obtidos numericamente pelo *software* simulink

U_{off} (V)	U_{in} (V)	U_{out} (V)
2,5	0	0,005
2,5	0,8	0,005
2,5	2	1,67
2,5	3	3,33
2,5	4	5
2,5	5	6,7

Da tabela 12, conclui-se que este sistema executa de forma bastante satisfatória a transformação pretendida do sinal de output do controlador. Observando-se a transformação de 0,8 V para 0,005 V, sendo assim possível, executar todos os patamares isotérmicos pretendidos assim como obter velocidades de aquecimento bastante reduzidas.

4.2 – Caracterização do funcionamento do forno de fundição

A caracterização do forno de fundição é bastante mais simples que a do forno de tratamentos térmicos, pois o processo de fundição não requer um rigoroso controlo sobre as taxas de aquecimento do forno assim como sobre o perfil térmico dentro do mesmo.

Ao ligar o sistema eléctrico acoplado ao forno de fundição verificou-se uma incapacidade do quadro eléctrico do laboratório suportar este sistema. Assim, analisou-se o forno de fundição recorrendo ao sistema eléctrico do forno de tratamentos térmicos.

Por forma a caracterizar o forno de fundição, colocaram-se quatro termopares no interior do mesmo. Devido ao cadinho, na fase de aquecimento se situar na zona inferior do forno, surgiu a necessidade de avaliar essencialmente essa zona. Assim colocaram-se dois termopares distantes de 5 cm de ambas as extremidades do forno, enquanto os outros dois, foram colocados um a meio do forno e o outro a meio da metade inferior do forno, como mostra a figura 78.

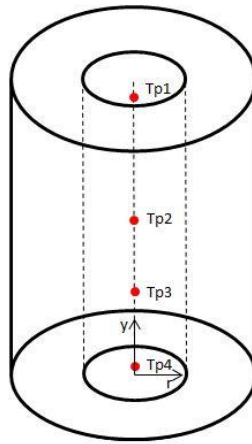


Figura 78 – Esquema do posicionamento dos termopares

Por forma a avaliar o comportamento do forno de fundição programou-se uma taxa de aquecimento de $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ até atingir $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, sendo mantido a essa temperatura durante perto de uma hora. Da figura 79, observa-se uma grande proximidade entre os termopares Tp1, Tp2 e Tp3, notando-se, uma zona fria perto da extremidade inferior do forno. Verifica-se também um incumprimento do patamar isotérmico a $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, tendo aumentado cerca de $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante uma hora o que representa um erro relativo de 7,5%.

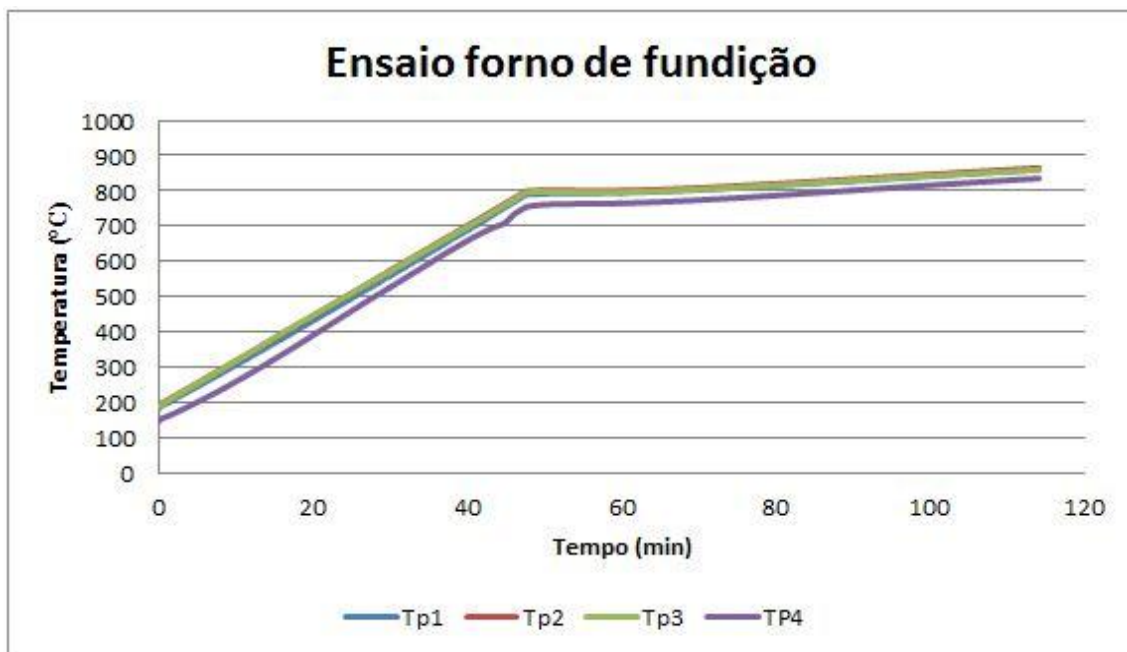


Figura 79 – Ensaio do forno de fundição

De modo a estudar o perfil térmico do forno, analisou-se o instante de tempo $t = 81\text{ min}$ (figura 80). Verifica-se que é no centro do forno onde se regista a temperatura mais elevada. Observa-se também que a diferença entre Tp2 e Tp1 é de $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, enquanto que a diferença entre Tp3 e Tp2 é de $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ainda da figura 79 pode-se observar a diferença de temperaturas registadas entre os termopares 3 e 4, na ordem dos $28\text{ }^{\circ}\text{C}$.

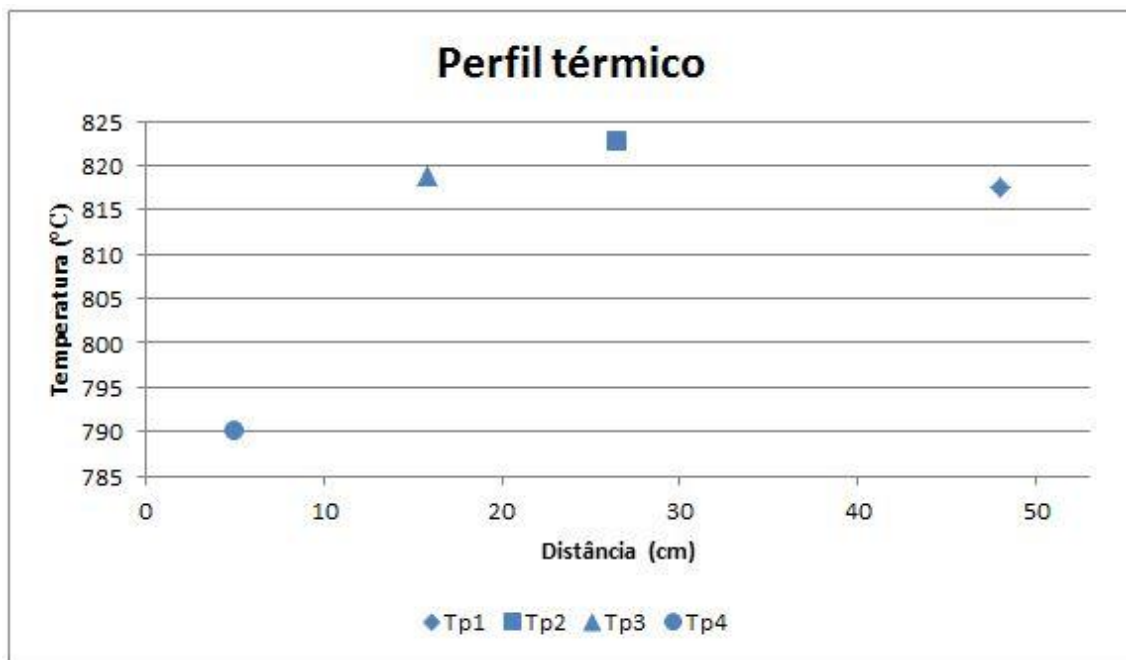


Figura 80- Perfil térmico no instante t=81 min

Estudando a variação de temperaturas registadas entre os 4 termopares, durante todo o ensaio, identifica-se uma diferença média entre Tp1 e Tp2 de 6,4 °C, bastante semelhante à diferença média registada entre os termopares, 2 e 3 de 5 °C, como se pode observar na figura 81. Verifica-se também, uma grande diferença de temperaturas registadas entre Tp3 e Tp4, sendo que a diferença média se situa nos 32 °C.

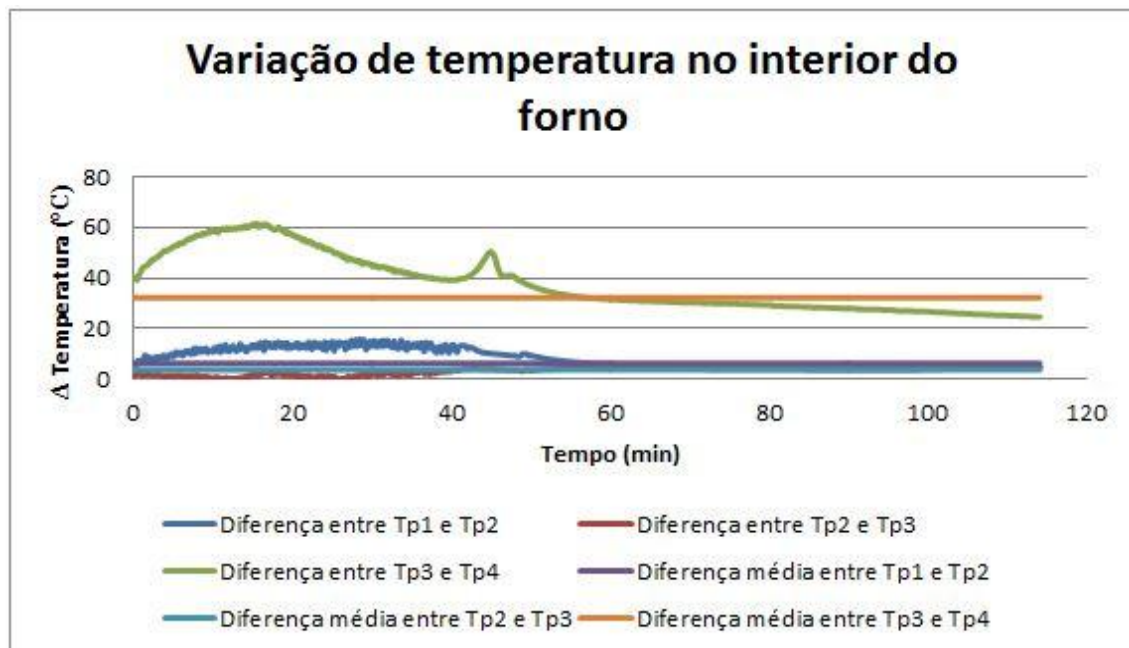


Figura 81 - Variação de temperaturas durante o ensaio de fundição

De forma idêntica ao forno anterior, testou-se o isolamento do forno, para isso aqueceu-se o forno até 800 °C e manteve-se a essa temperatura durante aproximadamente quatro horas, por forma a vencer a inércia térmica das paredes de isolante. Na figura 82, pode-se observar a evolução da temperatura exterior da tampa de isolante assim como da própria câmara e do isolante inferior do forno. Verificam-se perdas de calor elevadas pela parte inferior do forno, sendo que a face exterior do isolante atinge 188°C. A temperatura exterior da tampa e da câmara são próximas sendo respectivamente 77°C e 70°C. Verifica-se também uma elevada inércia térmica da câmara e da tampa de isolante que apenas estabilizam passado 2,6 horas.

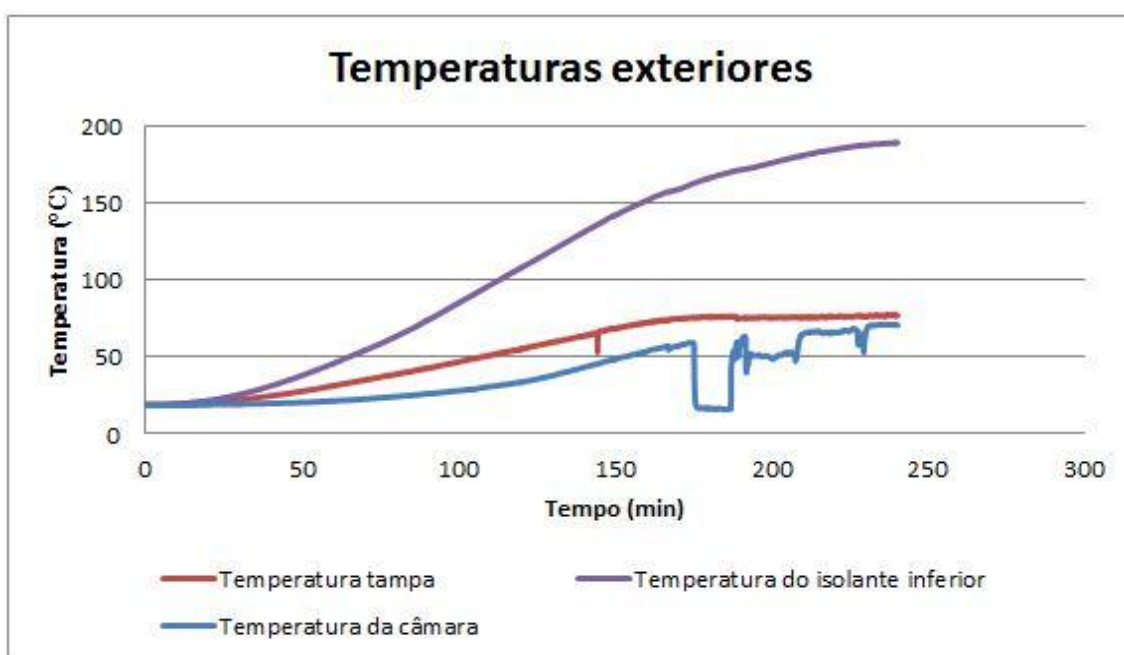


Figura 82 - Evolução da temperatura nas paredes exteriores do isolante.

Na tabela 13, estão representadas as temperaturas das paredes externas de isolantes estimadas analiticamente e as temperaturas reais, registadas pelos termopares, observando-se um erro relativo bastante elevado no cálculo da temperatura exterior da câmara assim como do isolante inferior, sendo que este ultimo provém das simplificações feitas no cálculo anteriormente descrito.

Tabela 13 – Temperaturas nas paredes exteriores de isolante no forno de fundição

	Temperatura estimada analiticamente (°C)	Temperatura medida (°C)	Erro relativo (%)
Tampa	76,7	77	0,38
Câmara	90,4	70	22
Isolante inferior	133	188	30

Devido a terem-se verificado fortes perdas térmicas pela extremidade inferior do forno de fundição, que implicam um gradiente térmico bastante elevado no interior do mesmo, decidiu-se otimizar o forno de fundição. Para isso, reforçou-se o isolamento térmico na extremidade inferior do forno com placa de fibra cerâmica, passando de uma espessura de isolante de 5 para 10 cm. Com esta pequena alteração verificou-se uma diminuição bastante acentuada do gradiente térmico no interior do forno (figura 83), observando-se um decréscimo de 21 °C entre as leituras dos termopares 3 e 4.

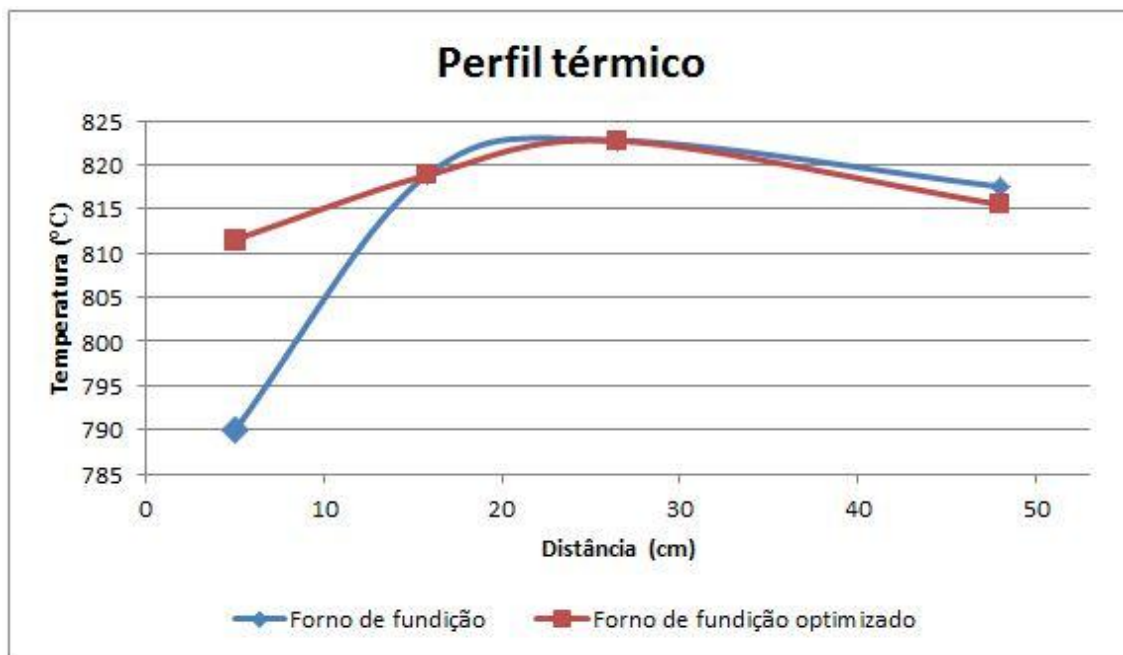


Figura 83 - Perfil térmico do forno de fundição, antes e depois de otimizado

Capítulo 5 – Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Com o trabalho realizado foi possível pôr em funcionamento dois fornos existentes no NTI, um com o objectivo de realizar alguns tratamentos térmicos, entre os quais, tratamento de envelhecimento de ligas de alumínio e recozimento de aços, e outro para fundição de ligas com baixo ponto de fusão.

Projectaram-se e construíram-se os elementos necessários ao funcionamento de ambos os fornos, com especial ênfase para o sistema de posicionamento do cadinho, assim como para o sistema de abertura do forno, no caso do forno de fundição. Para o forno de tratamentos térmicos, devido a ter sido adaptado para funcionar na posição horizontal, foi necessário projectar e construir uma base onde o forno assentasse assim como, um sistema de posicionamento das amostras constituído por uma estrutura interna e por um tabuleiro.

Foram instalados os sistemas de controlo e potência em ambos os fornos. Estes possuem dois controladores térmicos que controlam os respectivos reguladores de potência, controlando assim a potência necessária para atingirem as taxas de aquecimento requeridas pelos processos tecnológicos a serem efectuados nos mesmos.

Caracterizou-se o funcionamento de ambos os fornos, instrumentando-os, recorrendo a vários termopares ligados a um sistema de aquisição de dados, composto por um módulo de aquisição de temperaturas e um *software* feito, em LabView 2010, com o objectivo de registar a cada instante a evolução da temperatura no tempo.

Dos testes efectuados ao forno de tratamentos térmicos conclui-se que:

- Existe um bom controlo sobre as taxas de aquecimento impostas.
- É difícil efectuar patamares isotérmicos inferiores a 600 °C, pois o controlador PID apenas consegue executar de forma satisfatória os patamares isotérmicos acima deste valor, devido às perdas do forno compensarem a taxa mínima de aquecimento imposta pelo PID. Isto deve-se ao sinal de saída do controlador ter sido modificado por forma a ser coerente com o sinal de entrada do regulador de potência, tiristor. Tendo sido transformado um output de 4 a 20 mA num sinal de 0,8 a 5 V. Também devido a este problema o forno nunca desliga automaticamente, pois o tiristor apenas desliga ao receber uma diferença de potencial nula, o que não se verifica com este controlador. De modo a eliminar este problema, desenvolveu-se um circuito eléctrico que permite transformar o valor mínimo de output do controlador, passando assim de 0,8, para 0 V.

- O forno apresenta um gradiente térmico longitudinal relativamente baixo entre os pontos $y=16,5\text{cm}$ e $y=36,5\text{ cm}$ para temperaturas inferiores a $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ aumentando sensivelmente para o dobro a temperaturas superiores a $450\text{ }^{\circ}\text{C}$. Verificou-se também que o gradiente transversal ao plano do tabuleiro é bastante reduzido, na ordem dos $0,15\text{ }^{\circ}\text{C/cm}$.
- Existe uma zona útil do forno bastante aceitável para tratamentos térmicos até $450\text{ }^{\circ}\text{C}$, de 20 cm de comprimento. Sendo que para tratamentos térmicos a temperaturas superiores a $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ esta diminui para metade. Situando-se assim entre $y=16,5\text{cm}$ e $26,5\text{ cm}$. Existem duas zonas frias perto de ambas as extremidades do forno.
- O forno encontra-se bem isolado, verificando-se com este em regime permanente a 800°C uma temperatura exterior na porta de 59°C . As perdas de energia mais significativas dão-se pela tampa de isolante posterior, sendo que esta atinge os $97\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- A taxa de arrefecimento do forno é bastante reduzida, demorando cerca de 33 horas a arrefecer dos 800°C até à temperatura ambiente.

Depois de testado o forno de fundição verificou-se que:

- O forno de fundição não pode funcionar com o seu sistema de potência, uma vez que a instalação eléctrica do laboratório não tem capacidade para suportar a carga exigida por este.
- Existe um gradiente térmico longitudinal no interior do forno de $0,45\text{ }^{\circ}\text{C/cm}$, verificando-se uma diferença, sensivelmente de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre o centro do forno e a extremidade inferior do mesmo.
- Há uma perda de calor significativa pela extremidade inferior do forno. Nas restantes paredes de isolante verifica-se um óptimo isolamento, sendo que com o forno mantido em regime permanente a 800°C a tampa do forno encontra-se a 77°C e a câmara do forno a 70°C .

Como oportunidades de melhoria destes equipamentos sugere-se:

- Construir o circuito eléctrico de transformação do output do controlador, por forma a otimizar o controlo sobre o forno de tratamentos térmicos.
- Desenvolver e conceber um sistema de convecção forçada no interior do forno de tratamentos térmicos com o objectivo de anular o gradiente térmico no interior do mesmo.
- Instalar um sistema de atmosfera controlada no interior do forno de tratamentos térmicos, por forma a eliminar alguns problemas decorrentes da presença de oxigénio no interior do forno, assim como fenómenos de descarbonatação.
- Optimizar o sistema de potência do forno de fundição, de modo a que seja possível funcionar com o sistema eléctrico instalado no laboratório.

Referencias Bibliográficas

- [1] Dossell Jon e Boyer Howard, 2006, Practical Heat Treating, 2ª edição, ASM International, USA
- [2] Mullinger, Peter e Jenkins, Barrie, 2008, Industrial and Process Furnaces, 1ª edição, Butterworth-Heinemann, Burlington, USA
- [3] Carvalho Ferreira, J, 1999, Tecnologia da Fundição, 1ª edição Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa
- [4] <http://www.engenhariatermica.eng.br/fornos.htm> acessado no dia 27/02/2012
- [5] Chiaverini, Vicente, 1986, Tecnologia Mecânica Volume 2, 2ª edição, McGraw-Hill, São Paulo, Brasil
- [6] Prabhudev, K.H, 2008, Handbook of Heat Treatment of steels, 12ª edição, McGraw-Hill, New Delhi, India
- [7] <http://www.thermidor.fr/en/p.traittherm.php> acessado no dia 24/06/2011
- [8] <http://atbinco.com/sn/staticPages/page/15> acessado dia 27/02/2012
- [9] http://www.cecof.org/cms/upload/4_Facts/CECOF_Facts_and_Figures_2010-03-10.pdf acessado no dia 24/06/2011
- [10] http://www.aksteel.com/pdf/markets_products/stainless/austenitic/316_316L_Data_Bulletin.pdf acessado dia 26/06/2011
- [11] Moura Branco, Carlos A.G, 1998, Mecânica dos materiais, 3ª edição, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa
- [12] Guerra, Leonardo, 2006, Uso de um compensador PID no controle da taxa de variação de temperatura em um forno elétrico a resistência, Universidade Federal do Rio de Janeiro, pp 44, Rio de Janeiro, Brasil

[13] Trinks, W e Mawhinney, M.H, e Shannon, R.A e Reed, R.J. e Garvey, J.R, 2004, Industrial Furnaces, 6ª edição, John Wiley & Sons, New Jersey, USA

[14] Thirumaleshwar, M, 2006, Fundamentals of Heat & Mass Transfer, 1ª edição, Pearson education, New Dheli, India

Anexos

A1 - Instruções básicas de programação do controlador acoplado ao forno de tratamentos térmicos – RKC - P 300

Estes controladores têm como objectivo executar rampas de aquecimento e patamares isotérmicos com grande precisão. De seguida apresenta-se o procedimento de programação do controlador RKC-P300 de modo a realizar os programas pretendidos. Para isso recorreu-se a um exemplo, ilustrado na figura 84, em que os segmentos 1 e 3 consistem em duas rampas de aquecimento enquanto o segmento 2 consiste num patamar isotérmico.

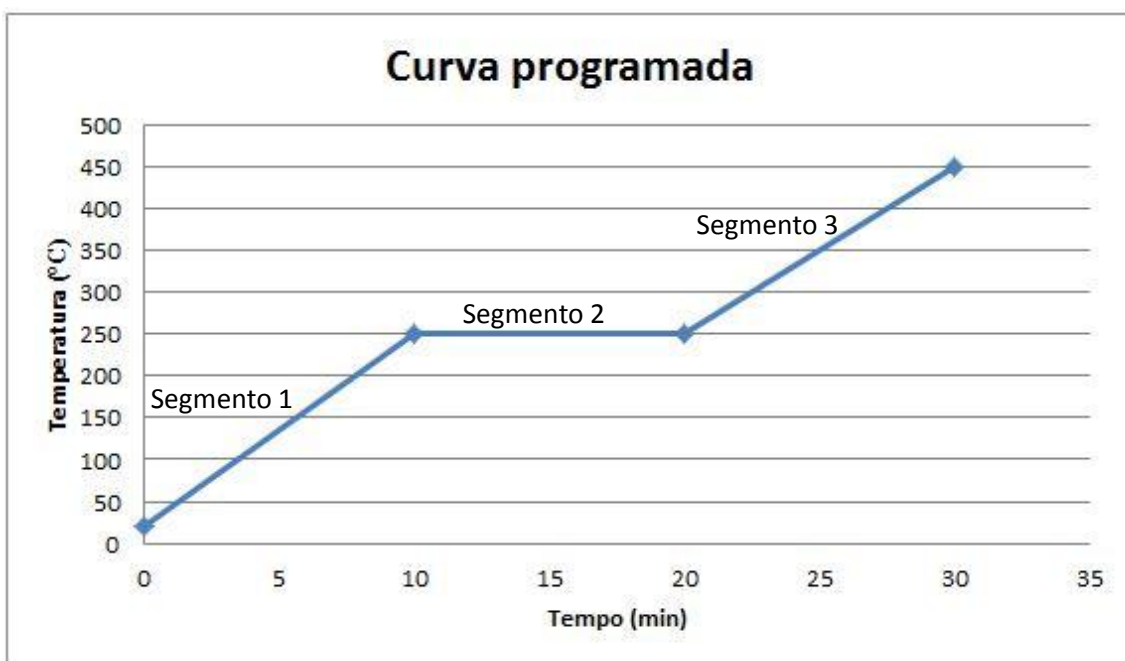


Figura 84 – Curva programada, exemplo 1

Escolha do programa;

- Ao ligar o controlador, premir SET.
- Premir os botões UP/DOWN de modo a seleccionar o programa desejado (T1 a 16).
- Depois de seleccionado o programa premir SET, de modo a definir o segmento desejado.





Tempo de execução do segmento;

- Premir as setas UP/DOWN de modo a definir o tempo necessário para atingir a temperatura desejada, definida anteriormente.
- Premir SET



Tempo de execução do segmento;

- Premir as setas UP/DOWN
- Carregar em SET



Segmento 1

Temperatura desejada;

- Carregar nas setas UP/DOWN de modo a configurar a temperatura que se deseja atingir.
- Premir SET



Segmento 2

Temperatura desejada;

- Carregar nas setas UP/DOWN de modo a definir a temperatura que deseja alcançar.
- Premir SET



Segmento 3

Temperatura desejada;

- Premir UP/DOWN até atingir a temperatura desejada.
- SET

Tempo de execução do segmento;

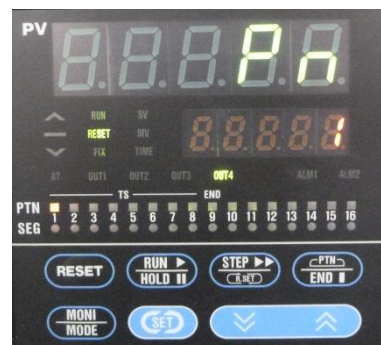
- Carregar nas setas UP/DOWN até definir o tempo desejado de execução do segmento.



- Depois de definido o segmento, premir SET para continuar a definir o programa.
- Caso se queira terminar e gravar o programa premir END. A luz vermelha revela em que “canal” está gravado o programa enquanto as 3 luzes verdes, significam o número de segmentos programados.

Execução do programa

- Depois de programado, Premir PTN e escolher qual o programa desejado (1 a 16)
- Premir SET e em seguida RUN.



Display do controlador durante a execução do programa

- O controlador indica a verde, em cima, a leitura do termopar e a vermelho, em baixo, a temperatura desejada num determinado instante.
- Caso queira interromper a execução do programa, premir HOLD.

A2 - Instruções básicas de programação do controlador acoplado ao forno de fundição – RKC - P 96

De forma semelhante à anterior, apresentam-se o procedimento de programação do controlador RKC P96 de modo a realizarem os programas desejados.



Figura 85 – Curva programada, exemplo 2



Segmento 1

Temperatura desejada;

- Premir as setas UP/DOWN até atingir a temperatura desejada.
- De seguida carregar em SET

Escolha do programa

- De modo a configurar o programa desejado, premir PTN1/PTN2
- Premir SET, o número 1 indica o canal seleccionado.





Segmento 2

Temperatura desejada;

- Premir as setas UP/DOWN até atingir a temperatura desejada.
- De seguida carregar em SET



- Depois de definido o segmento, premir SET para continuar a definir o programa.
- Caso se queira terminar e gravar o programa premir END.



Tempo de execução do segmento;

- Pressionar as setas UP/DOWN até atingir o tempo necessária à execução do segmento.
- Premir SET, de modo a definir o próximo segmento.



Tempo de execução do segmento;

- Pressionar as setas UP/DOWN até atingir o tempo necessária à execução do segmento.



Execução do programa

- Premir PTN1/PTN2 de modo a escolher qual o programa a executar, depois de seleccionado o programa premir RUN.

B1 – Especificações do ampop utilizado na simulação em simulink

